

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

*Trabajo de titulación previo a
la obtención del título de
Ingeniero Mecánico Automotriz*

PROYECTO TÉCNICO:

**“ANÁLISIS DE LAS FUERZAS GENERADAS EN LA ESTRUCTURA
DE UN BUS DE SERVICIO DE TRANSPORTE DE PASAJEROS
DURANTE UNA RUTA DE SERVICIO”**

AUTORES:

LUIS HERNÁN ORELLANA JIMÉNEZ
MANUEL ALEJANDRO ORELLANA JIMÉNEZ

TUTOR:

ING. MARCO ESTEBAN AMAYA PINOS, MSc.

CUENCA - ECUADOR

2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Luis Hernán Orellana Jiménez con documento de identificación N° 0706267002 y Manuel Alejandro Orellana Jiménez con documento de identificación N° 0706267010, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DE LAS FUERZAS GENERADAS EN LA ESTRUCTURA DE UN BUS DE SERVICIO DE TRANSPORTE DE PASAJEROS DURANTE UNA RUTA DE SERVICIO”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecánico Automotriz*, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Cuenca, julio del 2020



Luis Hernán Orellana Jiménez

C.I. 0706267002



Manuel Alejandro Orellana Jiménez

C.I. 0706267010

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi autoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DE LAS FUERZAS GENERADAS EN LA ESTRUCTURA DE UN BUS DE SERVICIO DE TRANSPORTE DE PASAJEROS DURANTE UNA RUTA DE SERVICIO”**, realizado por Luis Hernán Orellana Jiménez y Manuel Alejandro Orellana Jiménez, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulado por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2020



Ing. Marco Estaban Amaya Pinos, MSc.

C.I. 0102263480

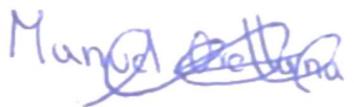
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Luis Hernán Orellana Jiménez con documento de identificación N° 0706267002 y Manuel Alejandro Orellana Jiménez con documento de identificación N° 0706267010, autores del trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DE LAS FUERZAS GENERADAS EN LA ESTRUCTURA DE UN BUS DE SERVICIO DE TRANSPORTE DE PASAJEROS DURANTE UNA RUTA DE SERVICIO”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, julio del 2020



Luis Hernán Orellana Jiménez
C.I. 0706267002



Manuel Alejandro Orellana Jiménez
C.I. 0706267010

AGRADECIMIENTO

“A nuestro padre DIOS por otorgarnos el regalo de la Vida”

“A nuestros padres, a mi hermano, tíos, y personas allegadas; por su apoyo incondicional y su confianza.” “A la UPS, por impartirnos en conocimiento adquirido.”

“Al Ingeniero Marco Amaya, por todo el apoyo y confianza brindada para el presente trabajo”

Los Autores

RESUMEN

El presente estudio consiste en analizar las fuerzas que se generan en bus de transporte de pasajeros durante una ruta de servicio, para lo cual se realizó en primer lugar una investigación sobre los accidentes en el Ecuador en los últimos años, además de los reglamentos internacionales que establecen parámetros para efectuar un análisis de impacto en la carrocería de manera frontal o vuelco.

En una primera instancia se efectuó la adquisición de datos en tiempo real de un bus de transporte de pasajeros en una ruta de servicio, y posterior a eso una tabulación de los datos obtenidos.

Con los datos medidos se procedió a realizar un análisis de impacto de la carrocería, esto fundamentado en los reglamentos ECE R66 Y UNECE 29, los cuales establecen los parámetros para realizar impactos de carrocería de buses mediante elementos finitos.

La primera etapa de la simulación consiste en el modelado de la carrocería de un bus de transporte público, para posteriormente en una segunda etapa aplicar las mediciones efectuadas y así plantear una simulación de impacto frontal, en donde se analiza la deformación de la carrocería y que esta no invada el espacio de supervivencia de los ocupantes en el bus.

Los resultados obtenidos mediante la simulación se los analiza y se comparara con lo que establece el reglamento en cuanto a las energías obtenidas del sistema y que las deformaciones de la carrocería no invadan el espacio de supervivencia de todos los ocupantes del bus, por otra parte, se ve el efecto de los esfuerzos generados debido a la deformación los cuales inciden directamente sobre la resistencia del material en que está fabricado.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO	5
RESUMEN	6
Tabla de Figuras	10
Índice de Ecuaciones	12
INTRODUCCION	13
PROBLEMA	14
OBJETIVOS	14
OBJETIVO GENERAL	14
OBJETIVO ESPECÍFICO	14
JUSTIFICACIÓN	15
1. Estado del arte	16
1.1 Historia del autobús	16
1.2 Clasificación de los accidentes	18
1.2.1 Accidente de tránsito	18
1.3 Reglamento ECE R66	19
1.4 Términos y definiciones del reglamento R66	20
1.4.1 Unidades de medida	20
1.4.2 Definiciones:	20
1.5 Especificaciones y requisitos generales	23
1.6 Especificación del ensayo de vuelco de un vehículo completo como método básico de homologación	25
1.7 Determinación del centro de gravedad del vehículo	26
1.7.1 La posición del centro de gravedad se define mediante tres parámetros:	27
1.8 Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE 29)	27
1.8.1 Tipos de pruebas que establece este reglamento para los vehículos de la categoría N1	28
2. Marco metodológico	30
2.1 Adquisición de datos	30
2.1.1 Velocidad	30
2.1.2 Tiempo	30
2.1.3 Frecuencia	30
2.1.4 Aceleración	30
2.1.5 Arduino	30

2.1.6	Acelerómetro.....	31
2.1.7	Giroscopio.	31
2.1.8	Batería.....	31
2.1.9	Memoria SD.	32
2.2	Estadística de accidentabilidad de buses en el Ecuador.	32
2.3	Construcción del dispositivo de medición.	34
2.4	Identificación de la ruta a realizarse la medición.....	34
2.5	Toma de datos.	34
2.6	Tabulación de los resultados obtenidos.....	35
2.6.1	Análisis de la distribución normal de los datos medidos.	35
2.7	Obtención de las funciones de aceleración.	37
2.7.1	Análisis de las ecuaciones de aceleración y desaceleración.....	38
3.	Análisis por medio de elementos finitos de la estructura del bus de transporte público..	39
3.1	Construcción del modelo de la carrocería.....	39
3.1.1.	Perfiles utilizados para construcción de carrocerías.	39
3.1.2.	Materiales utilizados para construcción de carrocerías.	40
3.1.3.	Dimensiones del bus.	41
3.1.4.	Superestructura del autobús.....	42
3.2	Condiciones de contorno.....	44
3.2.1	Masa distribuida del modelo.....	44
3.2.2	Velocidad inicial.	44
3.2.3	Material de la estructura.	44
3.3	Simulación mediante elementos finitos.	44
3.3.1	Especificación de las propiedades del material.	45
3.3.2	Generación de la malla para el modelo.....	46
3.3.3	Análisis de la calidad de la malla.	46
3.3.3.1	Warpage.....	47
3.3.3.2	Jacobiano.	47
3.3.3.3	Skewness.	48
3.3.4	Condiciones iniciales.....	48
3.3.5	Tiempo de ensayo.	49
3.4	Resultados del análisis del modelo realizado prueba A.	50
3.4.1	Esfuerzo de Von Mises.	50

3.4.2	Deformación.....	50
3.4.3	Balance de energía.....	52
3.4.4	Validación del Estudio.....	53
3.4.4.1	Validación Mediante el Método de Energía de Hourglass.....	53
3.5	Resultados del análisis del modelo realizado prueba B.	55
3.5.1	Esfuerzo de von mises.....	55
3.5.2	Deformación de la estructura.	55
3.5.3	Balance de energía.....	56
3.5.4	Validación Mediante el Método de Energía de Hourglass.....	57
4.	Resultados.....	58
4.1	Construcción del modelo.	58
4.2	Pre Procesamiento.....	58
4.3	Análisis de los resultados de la prueba “A”.	58
4.4	Análisis de los resultados para la prueba “B”.....	59
4.5	Comparación de resultados de la prueba “A” y “B”.....	59
5.	Conclusiones.....	61
6.	Recomendaciones.....	63
	Referencias Bibliográficas.....	64

Tabla de Figuras

Figura 1. Primeros buses de servicio público (Bartlett, D. W. (David W.), 2005)	16
Figura 2. Landauer de 1895.(Windpassinger, 2014)	16
Figura 3. Autobús de 2 pisos Daimler.(NUÑEZ MILÁN, 2017)	17
Figura 4. Autobús Mercedes-Benz regularizado.(NUÑEZ MILÁN, 2017)	17
Figura 5. Tipos de colisiones.(NUÑEZ MILÁN, 2017)	19
Figura 6. Especificación del contorno de la estructura deformada.(Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE), 2015).....	24
Figura 7. Especificación del espacio de supervivencia.(Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015).....	24
Figura 8. Disposición longitudinal.(Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015)	25
Figura 9. Especificación del ensayo de vuelco de un vehículo completo que muestra la trayectoria del centro de gravedad desde la posición inicial de equilibrio inestable.(Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015)	26
Figura 10. Prueba "A"(European Union, 2012).....	28
Figura 11. Prueba "B"(European Union, 2012).....	29
Figura 12. Arduino. Fuente: Autores.	31
Figura 13. Acelerómetro. Fuente: Autores.	31
Figura 14. Giroscopio. Fuente: Autores.	31
Figura 15. Batería litio. Fuente: Autores.	32
Figura 16. Memoria SD. Fuente: Autores.....	32
Figura 17. Estadísticas de accidentes 2019.(“Agencia Nacional de Tránsito ANT - Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador - ANT,” n.d.)	33
Figura 18. Ruta.(“de Zaruma a Cuenca - Google Maps,” n.d.)	34
Figura 19. Datos obtenidos. Fuente: Autores.	35
Figura 20. Curva Normal.(Walpole, 2012).....	35
Figura 21. Distribución normal de los datos medidos. Fuente: Autores.	36
Figura 22. Grafica de probabilidad de la aceleración. Fuente: Autores.....	36
Figura 23. Aceleración en el eje X del bus durante su ruta de servicio. Fuente: Autores.	37
Figura 24. Aproximación de desaceleración del bus. Fuente: Autores.....	37
Figura 25. Aproximación de la función de aceleración en la componente x. Fuente: Autores.	38
Figura 26. Modelado de la carrocería. Fuente: Autores.	39
Figura 27. Dimensiones de la carrocería en mm. Fuente: Autores.	42
Figura 28. Paneles que conforma la superestructura.(Moreno-Zulca, Llanes-Cedeño, Guaña-Fernández, & Jima-Matailo, 2020).....	42
Figura 29. Modelo y perfiles de la carrocería. Fuente: Autores.	44
Figura 30. Propiedades mecánicas del concreto. Fuente: Autores.	45
Figura 31. Propiedades mecánicas del acero galvanizado. Fuente: Autores.	45
Figura 32. Generación de la malla de la estructura. Fuente: Autores.	46
Figura 33. Jacobiano de los elementos del bus. Fuente: Autores.	47
Figura 34. Grafico estadístico de la calidad de malla. Fuente: Autores.....	48
Figura 35. Condiciones de borde de la pared. Fuente: Autores.....	49
Figura 36. Condiciones de la carrocería velocidad. Fuente: Autores.	49

Figura 37. Esfuerzo equivalente de Von Mises. Fuente: Autores.....	50
Figura 38. Deformación de la carrocería. Fuente: Autores.....	51
Figura 39. Deformación de la carrocería versus tiempo de ensayo. Fuente: Autores.	51
Figura 40. Energía cinética e interna en (mJ). Fuente: Autores.	52
Figura 41. Balance de energía en (mJ). Fuente: Autores.	53
Figura 42. Energía Total y Hourglass. Fuente: Autores.....	54
Figura 43. Esfuerzo de Von-Mises. Fuente: Autores.....	55
Figura 44. Deformación de la carrocería. Fuente: Autores.....	55
Figura 45. Deformación de la carrocería versus tiempo. Fuente: Autores.	56
Figura 46. Balance de energía mj. Fuente: Autores.....	56

Índice de Ecuaciones

(1).....	52
(2).....	54

INTRODUCCION

En el Ecuador en los últimos años existe un alto índice de accidentes en el servicio de transporte público de pasajeros, esto conlleva a lamentables pérdidas de vidas humanas. Las cifras de siniestros en el año 2019 son de 1076 en donde se encuentran involucrados los buses de transporte interprovincial, tomando en cuenta que estos poseen un mayor aforo de pasajeros.

La normativa internacional vigente ECE R66 Y UNECE 29 establecen los lineamientos para realizar pruebas de volcamiento, los cuales especifican que el espacio de supervivencia no debe ser invadido al momento que se produce un siniestro, además establecen condiciones iniciales para simulaciones de impacto frontal; mientras que la normativa nacional NTE INEN 1688 especifica las dimensiones de la carrocería y la NTE INEN 1323 establece que tipo de materiales se debe utilizar para su fabricación.

Los elementos finitos es una herramienta que permite analizar de una manera práctica y sencilla los fenómenos físicos suscitados en una carrocería, ya que esta estructura está constituida por geometrías complejas, por lo tanto, el ensayo virtual facilita el estudio de estos elementos lo cual permitirá obtener resultados válidos para procesos de diseño.

Con la carrocería modelada se configura las condiciones iniciales, tomando en cuenta las mediciones efectuadas durante la ruta de servicio, posterior a eso se efectúa una simulación de impacto frontal donde el efecto de la conducción, referente a las aceleraciones y desaceleraciones, afectan directamente en la carrocería.

Debido a una colisión frontal que se produzca en cualquier intervalo de tiempo y dependiendo de los factores que se susciten en ese instante, estos van a tener un efecto sobre la carrocería, específicamente en la deformación de la estructura, la cual no debe invadir el espacio de supervivencia y de esta manera disminuir los riesgos que puedan sufrir los pasajeros del bus.

PROBLEMA

En los últimos años en vías del Ecuador se han producido accidentes catastróficos en diferentes compañías de servicio de transporte interprovincial con pérdidas humanas lamentables. La principal causa de accidentes de tránsito fue la impericia o imprudencia del conductor (50,9%), publicado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC 2018), seguido del irrespeto a las señales de tránsito (13,4%) y en tercer lugar el exceso de velocidad (12,4%) con lo cual no cumple lo que estipula el Art. 191 del Reglamento a la Ley de Transporte Terrestre Tránsito y Seguridad Vial; además las fuerzas que se generan en la estructura del bus por la velocidad a la que está circulando se suman a la deformación de la carrocería ante una colisión o volcamiento; por lo expuesto es imperante el análisis de la variable de la velocidad del vehículo de transporte público en el cual circula previo a un accidente de tránsito y los efectos que tiene esta durante la colisión o volcamiento.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Analizar las fuerzas generadas en la estructura de un bus interprovincial por efecto de la conducción.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- Realizar el estudio del estado del arte mediante la revisión bibliográfica científica para soportar las variables de interés de estudio.
- Determinar las fuerzas generadas mediante la medición de velocidades con la utilización de acelerómetros en bus interprovincial.
- Analizar mediante elementos finitos la estructura del bus interprovincial sometida a las fuerzas generadas por la conducción durante un siniestro.
- Estudiar los resultados obtenidos de la simulación realizada por medio de elementos finitos para la verificación del espacio de supervivencia.

JUSTIFICACIÓN

La tasa de siniestralidad en los últimos años en el Ecuador aumentado debido a la impericia, imprudencia o inobservancia de las señales de tránsito por parte de conductores con pérdidas humanas por lo que el presente estudio ayudara a nuevas propuestas de diseños de carrocerías para el servicio de transporte publico interprovincial de pasajeros.

El presente estudio pretende analizar el efecto de la velocidad de circulación de un bus interprovincial en las fuerzas que se generan al momento de producirse una colisión, teniendo en cuenta que las velocidades generadas dependen de la forma de conducción de este medio de transporte, ya que estas producen fuerzas que no son consideradas al realizar un análisis de los efectos producidos en la carrocería de un bus interprovincial durante un siniestro.

Los resultados obtenidos del estudio planteado ayudarán a generar propuestas de diseños de estructuras para autobuses que contemplen la problemática expuesta.

1. Estado del arte.

1.1 Historia del autobús.

Los primeros autobuses, figura 1, que comenzaron a circular fueron propulsados por caballos los cuales eran capaces de desplazar a una cierta cantidad de personas. (CUATZO LOZANO, 2005)

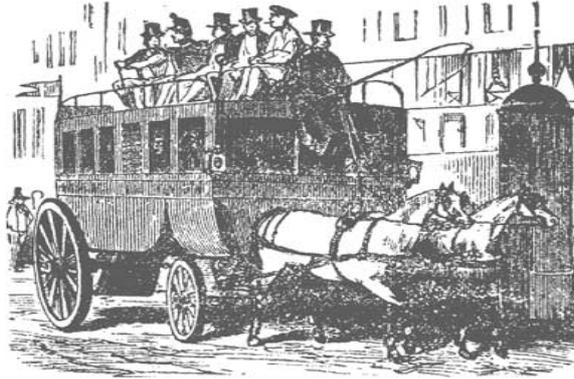


Figura 1. Primeros buses de servicio público (Bartlett, D. W. (David W.), 2005)

Los primeros buses de servicio para el transporte público que empezaron a fabricarse ya incorporaban un motor a vapor, fue lanzado en el año de 1831 en Inglaterra para una capacidad de 10 pasajeros. En 1895, Karl Benz lanza su primer prototipo el cual ya incorporaba un motor de combustión interna (MCI), lo cual lo denominó como el Landauer, como se muestra en la figura 2, y la carrocería que poseía era similar a las de ese tiempo que incorporaba un motor de 4 tiempos con una potencia de 5 CV, el cual podía alcanzar una velocidad máxima de 15 km/h y lograba transportar hasta máximo 8 personas incluido el conductor. (CUATZO LOZANO, 2005)



Figura 2. Landauer de 1895. (Windpassinger, 2014)

En 1905 se abre la primera línea de autobuses propulsados por un motor de combustión interna (MCI) en Alemania, figura 3. Se trataba de autobuses Daimler que incorporaban motores de 4 cilindros con una potencia de 28 CV, además se comenzó a desarrollar nuevos diseños de

autobuses de dos pisos con una capacidad hasta 39 pasajeros y alcanzaban los 32 km/h.(CUATZO LOZANO, 2005)



Figura 3. Autobús de 2 pisos Daimler.(NUÑEZ MILÁN, 2017)

En 1911 surge SCANIA-VABIS empezaron a producir su propio autobús para tratar de igualar a la competencia que era Daimler-Benz.(CUATZO LOZANO, 2005)

A partir de ese momento, se comenzó con la fabricación de autobuses figura 4, y así mismo hubo la necesidad de proponer de cierta manera medidas de regulación y estándares de calidad. El cual se lanzó una serie de regulaciones para la disposición del motor, número y tamaño de puertas, parabrisas, etc.(NUÑEZ MILÁN, 2017)



Figura 4. Autobús Mercedes-Benz regularizado.(NUÑEZ MILÁN, 2017)

Desde entonces no se detienen los avances tecnológicos e innovaciones por parte de todas las marcas del mercado a nivel mundial, ya sea innovando en diseño como en seguridad para los ocupantes. Cada vez se han instado sistemas como cajas de cambios automáticas, sistema de retención, ABS, control de cambio de carril, sistemas de detección de sueño del conductor y así muchos de los sistemas más que ayudan a proteger la vida de los ocupantes.(NUÑEZ MILÁN, 2017)

La resistencia estructural de un autobús se define en el código ECE R66 (Reglamento n o 66 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) — Disposiciones uniformes

relativas a la homologación de vehículos de grandes dimensiones para el transporte de pasajeros por lo que respecta a la resistencia de su superestructura), el mismo que establece los parámetros a seguir para poder homologar la misma y asegurar que las dimensiones sean las correctas y que en ningún momento el espacio de supervivencia pueda ser invadido al momento que ocurre un accidente de tránsito.

1.2 Clasificación de los accidentes

1.2.1 Accidente de tránsito.

Un accidente de tránsito, accidente vial o siniestro automovilístico es un suceso imprevisto y ajeno al factor humano que altera la marcha normal o prevista del desplazamiento en las vialidades. Especialmente es aquel suceso en el que se causan daños a una persona o cosa, de manera repentina ocasionada por un agente externo involuntario. (Santriono Refki, 2019)

Aunque no existe una clasificación específica sobre los accidentes de tránsito como oficial a nivel internacional, se la puede dividir en varias categorías o tipos según diversos criterios para su diferenciación. A continuación, se detalla la clasificación más utilizada en general.(NUÑEZ MILÁN, 2017)

- **Dependiendo donde se produce:**
 - ✓ Urbanos.
 - ✓ En travesías.
 - ✓ Interurbanos: autopista, autovía, etc.

- **Según las consecuencias:**
 - ✓ Daños materiales.
 - ✓ Heridos.
 - ✓ Mortales.

- **En función del número de vehículos implicados:**
 - ✓ Simples.
 - ✓ Complejos.

- **Según la forma en que se producen:**
 - ✓ Choques: cuando el choque se produce entre un vehículo en movimiento y otro estacionado.
 - ✓ Colisiones: cuando los vehículos que han colisionado se encontraban en movimiento, figura 5, estas pueden ser:
 - Colisiones frontales.

- Colisiones perpendiculares.
- Colisiones oblicuas.
- Colisiones reflejas.
- Colisiones por alcances.
- Raspados.
- ✓ Atropellos.
- ✓ Accidentes con características especiales:
 - Salidas de vía.
 - Vuelco de campana: el vehículo rota sobre el eje longitudinal.
 - Vuelco de tonel: el vehículo rota sobre el eje longitudinal.(NUÑEZ MILÁN, 2017)

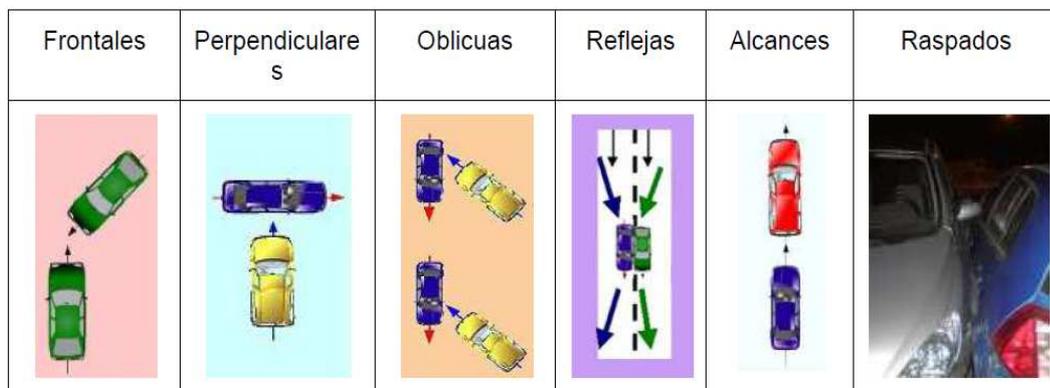


Figura 5. Tipos de colisiones.(NUÑEZ MILÁN, 2017)

1.3 Reglamento ECE R66.

El presente reglamento R66 se aplica a los vehículos de un solo piso, rígidos o articulados además tiene como objeto para ensayos de volcamiento, y no aplica para ensayos de impacto por alcance, por lo que cito este reglamento R66 que contiene conceptos necesarios para la realización del presente estudio, pertenecientes a la categoría M 2 o M 3, a la clase II o III o a la clase B, para más de 16 viajeros.(Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE), 2015)

- **Categoría M2**

Vehículos motorizados con capacidad mayor a 8 plazas, sin contar el asiento del conductor, y cuyo PBV no supere los 5000 kg.

- **Categoría M3**

Vehículos motorizados con más de 8 plazas, además del asiento del conductor, cuyo PBV sea superior a 5000 kg.

Los vehículos de la categoría M2 y M3, cuya capacidad sea superior a 22 plazas, sin contar al conductor se clasifica:

- **Clase I:** Vehículos diseñados y fabricados con áreas para pasajeros de pie.
- **Clase II:** Vehículos diseñados y fabricados para el transporte de pasajeros sentados y diseñados para el transporte de pasajeros de pie en el pasillo o en un área que no sobrepase el espacio previsto para dos asientos dobles.
- **Clase III:** Vehículos diseñados y fabricados exclusivamente para el transporte de pasajeros sentados.

A petición del fabricante, el presente Reglamento también podrá aplicarse a cualquier otro vehículo perteneciente a la categoría M2 o M3 que no se incluya en el apartado.(Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015)

1.4 Términos y definiciones del reglamento R66.

A los efectos del presente reglamento, se utilizarán los siguientes términos y definiciones.(Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015)

1.4.1 Unidades de medida.

Las unidades de medida serán las siguientes:

- Dimensiones y distancias lineales: metros (m) o milímetros (mm)
- Masa o carga: kilogramos (kg)
- Fuerza y peso: Newntons (N)
- Momento: newton-metros (Nm)
- Energía: julios (J)
- Constante gravitacional: $9,81 (m/s^2)$

1.4.2 Definiciones:

Este apartado tiene como finalidad conocer los conceptos establecidos en el reglamento R 66, de esta manera se seguirá los procedimientos correctos para el desarrollo de la presente investigación, además permite realizar una correcta simulación con los parámetros que la normativa estable.

- “Se entenderá por «vehículo» el autobús o autocar diseñado y equipado para el transporte de viajeros”.
- “Se entenderá por «tipo de vehículo» la categoría de vehículos fabricados con la misma especificación técnica de diseño, las mismas dimensiones principales y la misma disposición de construcción”.

- “Se entenderá por «grupo de tipos de vehículo» los tipos de vehículo, actuales y futuros, que estén incluidos en la homologación del peor caso, en relación con el presente Reglamento”.
- “Se entenderá por «el peor caso» el tipo de vehículo, dentro de un grupo de tipos de vehículo, que tenga menos probabilidades de cumplir los requisitos del presente Reglamento por lo que respecta a la resistencia de su superestructura. Los tres parámetros que definen el peor caso son: la resistencia estructural, la energía de referencia y el espacio de supervivencia”.
- “Se entenderá por «homologación de un tipo de vehículo» el proceso oficial completo mediante el cual el tipo de vehículo se somete a control y a ensayo para demostrar que cumple todos los requisitos especificados en el presente Reglamento”.
- “Se entenderá por «extensión de la homologación» el proceso oficial mediante el cual un tipo de vehículo modificado se homologa sobre la base de un tipo de vehículo previamente homologado, comparando los criterios de estructura, energía potencial y espacio residual”.
- “Se entenderá por «compartimento o compartimentos de viajeros» el espacio o espacios destinados a ser utilizados por los viajeros, salvo los ocupados por instalaciones fijas, como bares, cocinas o aseos”.
- “Se entenderá por «compartimento del conductor» el espacio destinado al uso exclusivo del conductor, en el que se encuentren el asiento del conductor, el volante, los mandos, los instrumentos y otros dispositivos necesarios para conducir el vehículo”.
- “Se entenderá por «dispositivo de retención» el dispositivo que, en caso de vuelco, mantenga unidos a su asiento a los viajeros, el conductor o los miembros del personal”.
- “Se entenderá por «plano central longitudinal vertical» (VLCP), el plano vertical que atraviesa los puntos medios de la trayectoria del eje delantero y del eje trasero”.
- “Se entenderá por «espacio de supervivencia» el espacio que ha de quedar en el compartimento o compartimentos del conductor, de viajeros y del personal para que el conductor, los viajeros y el personal tengan más posibilidades de sobrevivir en caso de vuelco.
- “Se entenderá por «masa en orden de marcha» (**Mk**) la masa del vehículo, sin ocupantes ni carga, pero con 75 kg de masa del conductor, la masa del combustible correspondiente al 90 % de la capacidad del depósito especificada por el fabricante y, en su caso, la masa del refrigerante, el lubricante, las herramientas y la rueda de repuesto”.
- “Se entenderá por «masa total de los ocupantes» (**Mm**) la masa combinada de los viajeros y el personal que ocupe asientos equipados con dispositivos de retención”.
- “Se entenderá por «masa total efectiva del vehículo» (**Mt**) la masa en orden de marcha del vehículo (**Mk**) combinada con la proporción ($k = 0,5$) de la masa total de los ocupantes (**Mm**) que se considere que está firmemente sujeta al vehículo”.
- “Se entenderá por «masa de cada ocupante» (**Mmi**) la masa de un solo ocupante, cuyo valor es de 68 kg”.

- “Se entenderá por «energía de referencia» (**ER**) la energía potencial del tipo de vehículo que se va a homologar, medida en relación con el nivel inferior horizontal de la cuneta en la posición inicial, inestable, del proceso de vuelco”.
- “Se entenderá por «ensayo de vuelco de un vehículo completo» el ensayo realizado con un vehículo completo, a escala real, para probar la resistencia exigida de la superestructura”.
- “Se entenderá por «banco de ensayo» el dispositivo técnico, compuesto por la plataforma de basculamiento, la cuneta y una superficie de cemento, utilizado en el ensayo de vuelco de un vehículo completo o de secciones de la carrocería”.
- “Se entenderá por «plataforma de basculamiento» el plano rígido que puede rotar alrededor de un eje horizontal para hacer bascular a un vehículo completo o una sección de la carrocería”.
- “Se entenderá por «carrocería» la estructura completa del vehículo en orden de marcha, incluidos todos los elementos estructurales que componen el compartimento o compartimentos de viajeros, el compartimento del conductor, el compartimento de equipajes y los espacios para las unidades y componentes mecánicos”.
- “Se entenderá por «superestructura» los componentes de la carrocería que soportan la carga, con arreglo a la definición del fabricante, contienen las partes y elementos coherentes que contribuyen a la resistencia y la capacidad de absorción de energía de la carrocería y preservan el espacio de supervivencia en el ensayo de vuelco”.
- “Se entenderá por «segmento» la sección estructural de la superestructura que forma una curva cerrada entre dos planos perpendiculares al plano central longitudinal vertical del vehículo. El segmento contiene un montante de ventana (o puerta) en cada lado del vehículo, así como elementos de la pared lateral, una sección de la estructura del techo y una sección de la estructura del piso y del falso piso”.
- “Se entenderá por «sección de la carrocería» una unidad estructural que representa una parte de la superestructura a efectos del ensayo de homologación. Una sección de la carrocería contiene, al menos, dos segmentos unidos por elementos de conexión representativos (estructuras laterales, del techo y del falso piso)”.
- “Se entenderá por «sección original de la carrocería» una sección de la carrocería compuesta por dos o más segmentos que tengan exactamente la misma forma y posición relativa que presentan en el vehículo real. Los elementos de conexión entre los segmentos también estarán dispuestos exactamente igual a como lo están en el vehículo real”.
- “Se entenderá por «sección artificial de la carrocería» una sección de la carrocería compuesta por dos o más segmentos, pero no colocados en la misma posición ni a la misma distancia unos de otros que en el vehículo real. Los elementos de conexión entre dichos segmentos no tendrán que ser idénticos a la estructura de la carrocería real, pero sí estructuralmente equivalentes”.
- “Se entenderá por «parte rígida» una parte o elemento estructural que no presente una deformación ni una absorción de energía significativas durante el ensayo de vuelco”.

- “Se entenderá por «zona plástica» una parte especial de la superestructura, limitada geoméricamente, en la cual, como resultado de fuerzas dinámicas de impacto: — se concentren grandes deformaciones plásticas, — se produzca una distorsión esencial de la forma original (sección transversal, longitud u otra magnitud geométrica), — se produzca una pérdida de estabilidad, como consecuencia del pandeo local, — se absorba energía cinética debido a la deformación”.
- “Se entenderá por «bisagra plástica» una zona plástica simple formada en un elemento tipo varilla (tubo sencillo, columna de ventana, etc.)”.
- “Se entenderá por «travesaño superior» la parte estructural longitudinal de la carrocería situada por encima de las ventanas laterales, que incluye la transición semicircular hacia la estructura del techo. En el ensayo de vuelco, el travesaño superior (en los autocares de dos pisos, el travesaño superior del piso superior) es el primero en golpear el suelo”.
- “Se entenderá por «travesaño inferior» la parte estructural longitudinal de la carrocería situada por debajo de las ventanas laterales. En el ensayo de vuelco, el travesaño inferior (en los autocares de dos pisos, el travesaño inferior del piso superior) puede ser la segunda zona que entre en contacto con el suelo, tras la deformación inicial de la sección transversal del vehículo”.(Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015)

1.5 Especificaciones y requisitos generales.

a) Requisitos.

La superestructura del vehículo tendrá la resistencia suficiente como para garantizar que el espacio de supervivencia no resulte dañado durante el ensayo de vuelco del vehículo completo ni una vez finalizado este; es decir:

Ninguna parte del vehículo que se encuentre fuera del espacio de supervivencia al inicio del ensayo (por ejemplo, montantes, anillas de seguridad o rejillas portaequipajes) invadirá el espacio de supervivencia durante el ensayo; a la hora de evaluar la invasión del espacio de supervivencia se ignorarán todas las partes estructurales que originalmente se encuentren en dicho espacio (por ejemplo, barras de sujeción verticales, tabiques, cocinas o aseos).(Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015)

Ninguna parte del espacio de supervivencia deberá sobresalir del contorno de la estructura deformada; el contorno de la estructura deformada se determinará secuencialmente, entre cada montante de ventana o puerta adyacente; el contorno entre dos montantes deformados será una superficie teórica, determinada por líneas rectas, que conecte los puntos del contorno interior de los montantes que se encontraban a la misma altura sobre el nivel del piso antes del ensayo de vuelco, figura 6. (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015)

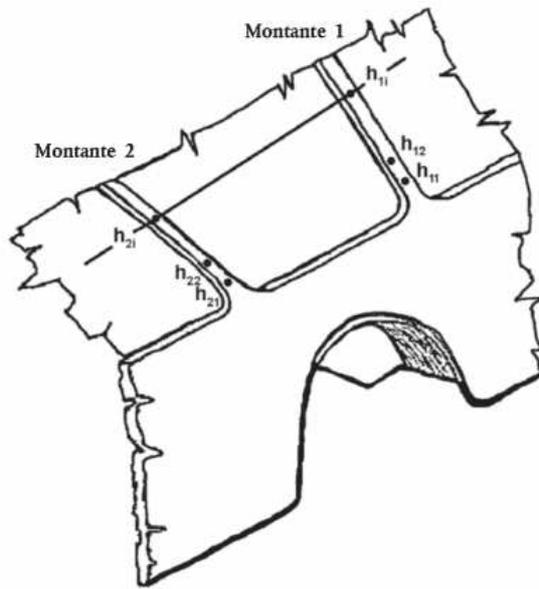


Figura 6. Especificación del contorno de la estructura deformada. (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE), 2015)

Para simular el peor caso en un grupo de tipos de vehículo y permitir futuros avances de diseño, el fabricante podrá definir un espacio de supervivencia mayor de lo necesario para una disposición de asiento determinada. (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE), 2015)

El envoltorio del espacio de supervivencia del vehículo se determinará creando en el interior del vehículo un plano transversal vertical que tenga los márgenes descritos en la figura 7, y desplazándolo por la longitud del vehículo figura 8. (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE), 2015)

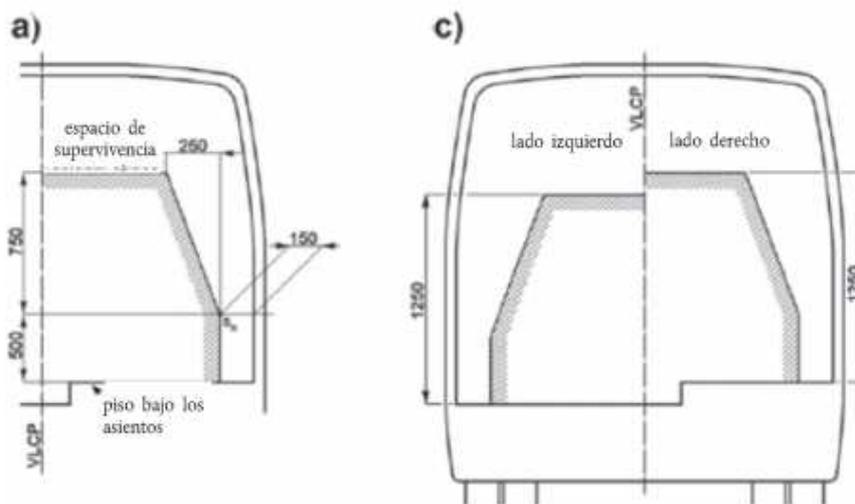


Figura 7. Especificación del espacio de supervivencia. (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE), 2015)

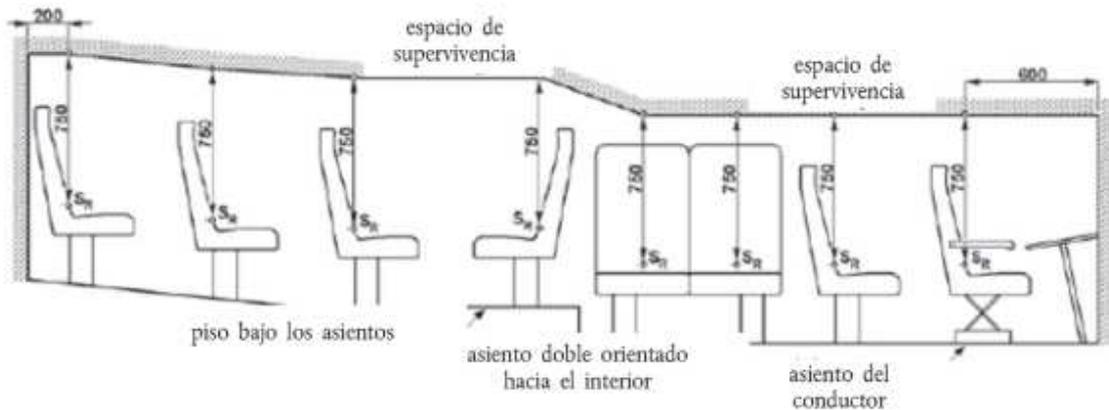


Figura 8. Disposición longitudinal. (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015))

1.6 Especificación del ensayo de vuelco de un vehículo completo como método básico de homologación.

El ensayo de vuelco es un ensayo de basculamiento lateral (véase la figura 9) que se desarrolla como sigue:

- El vehículo completo se coloca en la plataforma de basculamiento, con la suspensión bloqueada, y va inclinándose poco a poco hacia su posición de equilibrio inestable; cuando el tipo de vehículo no esté equipado con dispositivos de retención, se realizará el ensayo en condiciones de masa en orden de marcha; cuando el tipo de vehículo esté equipado con dispositivos de retención, se realizará el ensayo en condiciones de masa total efectiva del vehículo. (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015))
- El ensayo de vuelco, figura 9, empieza en la posición inestable del vehículo, con velocidad angular cero y el eje de rotación pasando a través de los puntos de contacto de las ruedas con el suelo; en ese momento, el vehículo se caracteriza por la energía de referencia (**ER**) anteriormente descrita en el apartado de términos y definiciones. (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015))

El vehículo cae de lado en una cuneta con superficie de cemento, horizontal, seca y lisa, cuya profundidad nominal es de 800 mm.

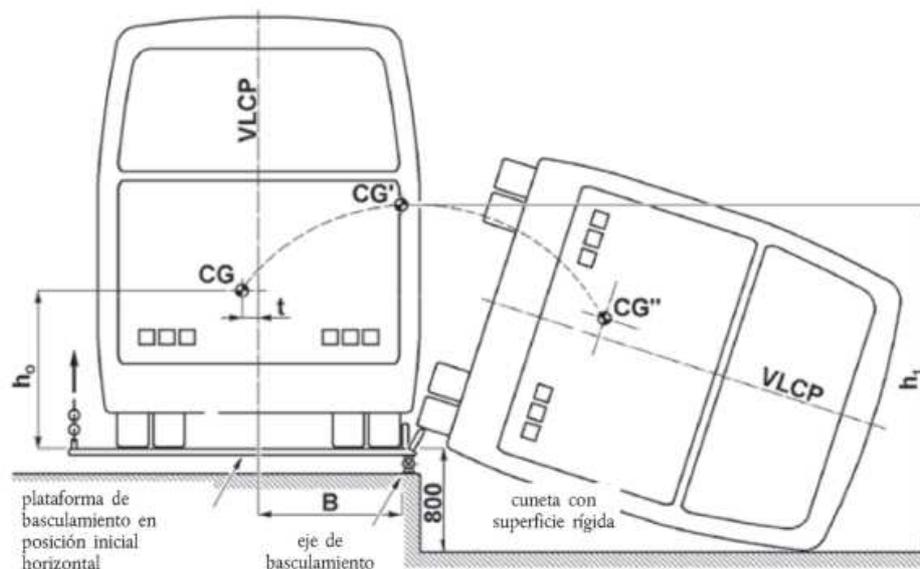


Figura 9. Especificación del ensayo de vuelco de un vehículo completo que muestra la trayectoria del centro de gravedad desde la posición inicial de equilibrio inestable. (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015))

1.7 Determinación del centro de gravedad del vehículo.

Para el presente estudio se tomó medidas a la carrocería del bus debido a que para calcular el centro de gravedad del todo el bus incluido todos accesorios, sistemas de suspensión, sistema de tracción, motor y todo lo equipa un bus por lo que es de mucha complejidad sacar medidas a cada parte que conforma un bus.

La energía de referencia y la energía total que van a ser absorbidas en el ensayo de vuelco dependen directamente de la posición del centro de gravedad del vehículo. Por tanto, su determinación debería ser lo más precisa posible. El servicio técnico registrará para su evaluación el método de medición de las dimensiones, los ángulos y los valores de carga, así como la precisión de las mediciones como se muestra en la tabla 1. (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015))

Tabla 1. Equipos de Medición Ofrezcan la Precisión Siguiente

Para mediciones inferiores a 2000 mm	precisión de ± 1 mm
Para mediciones superiores a 2000 mm	precisión de $\pm 0,05$ %
Para ángulos medidos	precisión de ± 1 %
Para valores de carga medidos	precisión de $\pm 0,2$ %

Fuente: (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015))

La distancia entre ejes y la distancia entre los centros del dibujo de la rueda o ruedas en cada eje (la vía de cada eje) se determinará a partir de los dibujos del fabricante.

El bloqueo de la suspensión se especifica como la condición para determinar el centro de gravedad y llevar a cabo el ensayo real de vuelco. La suspensión se bloqueará en la posición de funcionamiento normal definida por el fabricante.(Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE, 2015)

1.7.1 La posición del centro de gravedad se define mediante tres parámetros:

- Distancia longitudinal (l_1), desde la línea central del eje frontal.
- Distancia transversal (t), desde el plano central longitudinal vertical del vehículo.
- Altura vertical (h_0), por encima del nivel del suelo plano horizontal cuando los neumáticos están inflados con arreglo a lo especificado para el vehículo.

Aquí se describe un método para determinar l_1 , t y h_0 utilizando células de carga. El fabricante podrá proponer al servicio técnico métodos alternativos que utilicen equipos de levantamiento o plataformas de basculamiento.

La posición del centro de gravedad del vehículo sin carga masa en orden de marcha M_k o masa total efectiva del vehículo cuando esté equipado con dispositivos de retención) se determinará mediante mediciones.

1.8 Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE 29).

Este presente reglamento UNECE 29 hace referencia a ensayos de impacto por alcance solo a vehículos de la categoría N1, no toma en cuenta a los buses de servicio de transporte de pasajeros, por lo cual se realiza un análisis de las normativas internacional establecidas y así conseguir información importante para el presente estudio.

Este reglamento presenta dos tipos de pruebas para vehículos de la categoría N1, estas se detallan en la tabla 2.

Tabla 2. Prueba Para Vehículos Categoría N1.

<u>Tipo de Prueba</u>	<u>Detalles</u>
<i>Prueba "A"</i>	<i>Prueba de impacto frontal destinada a evaluar la resistencia de una cabina en accidente de impacto frontal.</i>
<i>Prueba "B"</i>	<i>Prueba de impacto en los pilares A, de la cabina destinada a evaluar la resistencia de una cabina en un accidente de vuelco de 90 ° con impacto posterior</i>

Fuente:(European Union, 2012)

1.8.1 Tipos de pruebas que establece este reglamento para los vehículos de la categoría N1.

1. Prueba de impacto frontal (Prueba A)

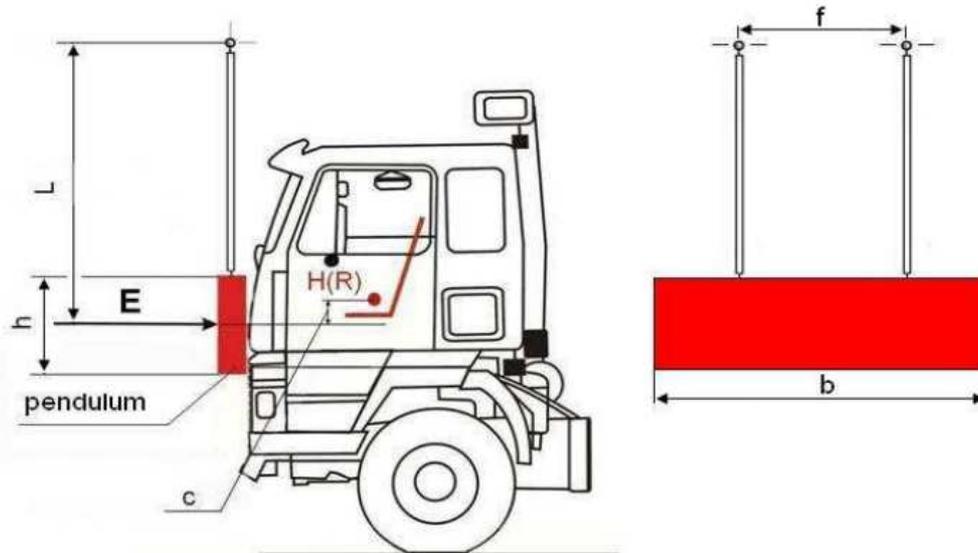


Figura 10. Prueba "A"(European Union, 2012)

- a. "El impactador estará hecho de acero y su masa estará distribuida uniformemente; su masa no será inferior a 1.500 kg. Su superficie llamativa, rectangular y plano, debe tener 2.500 mm de ancho y 800 mm de alto (ver b y h en la figura 10). Sus los bordes se redondearán a un radio de curvatura de $10 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ".(European Union, 2012)
- b. "El conjunto del impactador debe ser de construcción rígida. El impactador será suspendido libremente por dos vigas rígidamente unidas a él y espaciadas no menos de 1000 mm de separación (ver f en la figura 10). Las vigas no serán inferiores a 3.500 mm de largo desde el eje de suspensión hasta el centro geométrico de la impactador (L en la figura 10)".(European Union, 2012)

2. Prueba de impacto del pilar delantero (Prueba B)

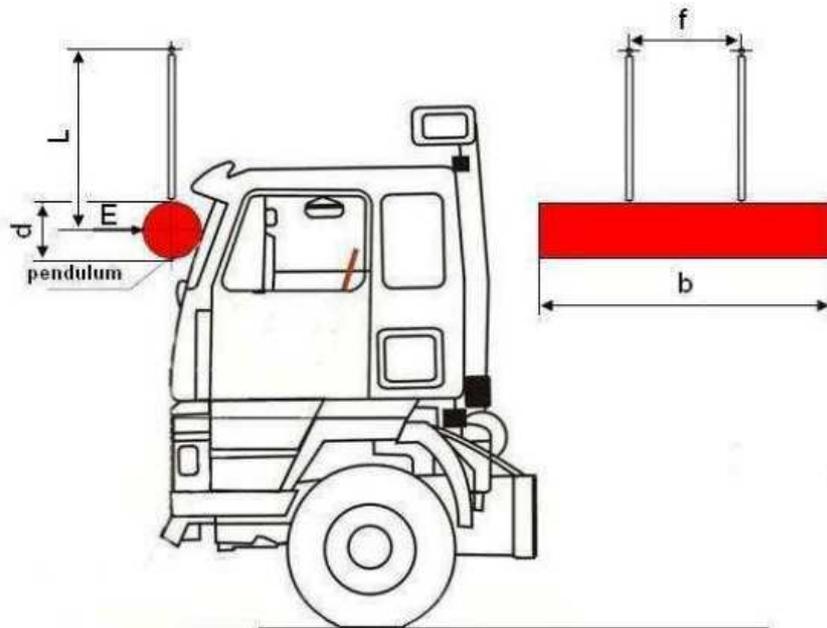


Figura 11. Prueba "B"(European Union, 2012)

- a. "El impactador deberá ser rígido y su masa deberá estar uniformemente distribuida; su masa no deberá ser inferior a 1,000 kg figura 11. El impactador será cilíndrico con un diámetro d del cilindro de 600 ± 50 mm y una longitud b no inferior a 2.500 mm. Sus bordes se redondearán a un radio de curvatura de no menos de 1,5 mm".(European Union, 2012)
- b. "El conjunto del impactador debe ser de construcción rígida. El impactador será suspendido libremente por dos vigas rígidamente unidas a él y espaciadas no menos de $f = 1,000$ mm de separación figura 11. Las vigas no deberán ser inferiores a $L = 3.500$ mm de largo. desde el eje de suspensión hasta el centro geométrico del impactador b o b' ".(European Union, 2012)

2. Marco metodológico.

2.1 Adquisición de datos.

2.1.1 Velocidad.

La velocidad es el nivel de rapidez con la que un objeto se desplazada en una fracción de tiempo dado. Se determina por medio del espacio o distancia recorrida en una unidad de tiempo, en cuanto más grande es el espacio recorrido mayor será la velocidad. (Ortiz & Educazione, 1860)

2.1.2 Tiempo.

La medición del tiempo es importante en todos los campos de la investigación científica. Como el tiempo es una de las unidades fundamentales a partir de la cual se derivan todas las unidades, es necesario que las mediciones de tiempo se hagan con mucha exactitud. Aunque los intervalos de tiempo se miden con muchas técnicas y dispositivos electrónicos para las mediciones correspondientes (Ortiz & d'Istruzione e d' Educazione, 1860)

2.1.3 Frecuencia.

Se define la frecuencia como el número de eventos recurrentes que tienen un lugar en un intervalo unitario de tiempo. La unidad de frecuencia es el Hertz (Hz). (Ortiz & d'Istruzione e d' Educazione, 1860)

2.1.4 Aceleración.

La aceleración es una magnitud vectorial, al igual que el desplazamiento o la velocidad. Por tanto, se caracteriza por tres elementos: módulo, dirección y sentido. Así como la velocidad nos expresa la rapidez en el cambio de posición, la magnitud que nos expresa la rapidez en el cambio de velocidad se denomina aceleración.(Pozo, 2012)

2.1.5 Arduino.

Es una placa de Hardware libre que incorpora un microcontrolador reprogramable y una fila de pines-hembra en el cual se puede conectar diversos sensores y actuadores de forma fácil y sencilla.(Artero, 2013)

Cuando se utiliza una placa Arduino se debe especificar qué modelo se va a utilizar por lo que cada placa Arduino posee diferentes características como el número de pines, modelo del microcontrolador incorporado, así como la cantidad de memoria utilizable que posee cada uno de estos modelos, figura 13. (Artero, 2013)



Figura 12. Arduino. **Fuente:** Autores.

2.1.6 Acelerómetro.

Es un módulo electromecánico que se utiliza para realizar mediciones de fuerzas de la aceleración, bien sea de forma estática o dinámica ya que son muy útiles para detectar vibraciones y el movimiento de los diferentes sistemas en que se ha empleado, figura 14.(Alberto & Álvarez, 2019)



Figura 13. Acelerómetro. **Fuente:** Autores.

2.1.7 Giroscopio.

Un giroscopio tiene su principal función que está basado en la conservación del momento angular, por eso se lo utiliza para medir la orientación por medio de las fuerzas que se van generando en su sistema de balanceo, figura 15.(Bernal Iñiguez, 2014)



Figura 14. Giroscopio. **Fuente:** Autores.

2.1.8 Batería.

Se llama fuente de alimentación eléctrica al elemento que se encarga de generar la diferencia de potencial necesaria para que circule la corriente por un circuito, y así de esta manera puedan funcionar los dispositivos conectados al mismo. La fuente que se utilizará en este proyecto será baterías recargables, figura 16. (Artero, 2013)

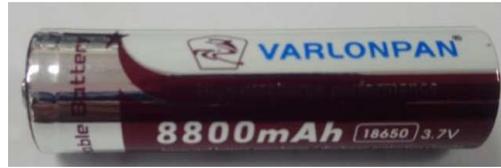


Figura 15. Batería litio. **Fuente:** Autores.

2.1.9 Memoria SD.

Las tarjetas de memoria SD (Secure Digital, seguridad digital) hoy en día son las más utilizados en el mundo ya sea en teléfonos celulares computadoras etc. Una de sus ventajas es la gran capacidad de almacenamiento de igual manera poseen una velocidad para almacenar datos, por esta razón se ha seleccionado este tipo de almacenamiento para el proyecto figura 17.(Álvarez & Paúl, 2014)



Figura 16. Memoria SD. **Fuente:** Autores.

2.2 Estadística de accidentabilidad de buses en el Ecuador.

Las estadísticas que presenta la Agencia Nacional de Transito en el año 2019 que involucraron a los buses de servicio de transporte de pasajeros se detalla en la tabla 3.

Tabla 3. Siniestros de Buses a Nivel Nacional 2019

<u>Meses</u>	<u>Vehículos Involucrados</u>	<u>Siniestros</u>	<u>Lesionados</u>	<u>Fallecidos en sitio</u>
Enero	143	93	111	7
Febrero	134	84	100	19
Marzo	137	97	91	8
Abril	151	95	105	11
Mayo	148	88	126	13
Junio	130	83	94	13
Julio	126	87	116	9
Agosto	168	100	135	18
Septiembre	149	96	112	18
Octubre	99	59	64	4

Noviembre	155	94	88	13
Diciembre	153	100	101	14
Total	1.693	1.076	1.243	147

Fuente: (“Agencia Nacional de Tránsito ANT - Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador - ANT,” n.d.)

Las estadísticas mostradas en la figura 17, especifican el acumulado de accidentes del 2019, para el servicio de transporte interprovincial e intrarregional a nivel nacional, el número de siniestros es de 367 y 1076 respectivamente correspondiente a todo el servicio de buses urbanos, interparroquial etc., en cambio se tiene 52 fallecidos para los servicios de transporte interprovincial intrarregional y 147 fallecidos que involucra a todo tipo de servicio de pasajeros.(“Agencia Nacional de Tránsito ANT - Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador - ANT,” n.d.)

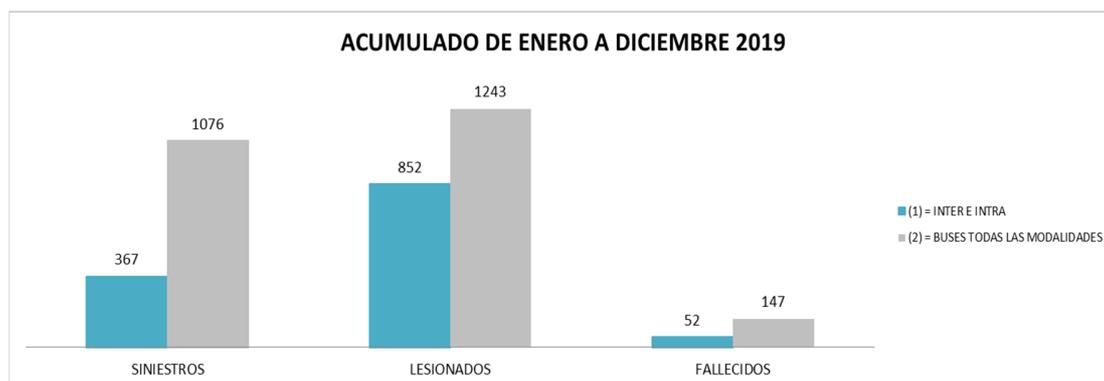


Figura 17. Estadísticas de accidentes 2019.(“Agencia Nacional de Tránsito ANT - Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador - ANT,” n.d.)

En lo datos estadísticos del año 2019, figura 17, se muestran las cifras de accidentes de buses del servicio de transporte interprovincial con una cantidad de siniestros de 1076 en donde hubo 1243 personas lesionadas y 147 fallecidas.(“Agencia Nacional de Tránsito ANT - Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador - ANT,” n.d.)

Analizando las estadísticas obtenidas de la Agencia Nacional Transito, se puede evidenciar un alto número de personas lesionadas y fallecidas, lo ideal es que no exista ninguna pérdida humana, motivo por el cual se debe considerar todas las condiciones que afectan a la carrocería del bus ante una colisión, permitiendo realizar un mejor diseño y disminuir la cantidad de personas con lesiones o que pierdan su vida durante una colisión.

2.3 Construcción del dispositivo de medición.

Para la construcción del equipo se utilizó un Arduino el cual se realizó la programación de los sensores (acelerómetro, giroscopio), y para grabar los datos obtenidos se instaló una memoria micro SD para realizar la grabación de los datos, así como baterías de larga duración para poder realizar la adquisición de datos durante una ruta de servicio.

2.4 Identificación de la ruta a realizarse la medición.

Para realizar la adquisición de datos para la realización de este proyecto se seleccionó una ruta específica tomando en cuenta las condiciones geográficas de la ruta la cual comprendió desde la ciudad de Cuenca Provincia del Azuay hasta la ciudad de Zaruma Provincia de El Oro, figura 18.

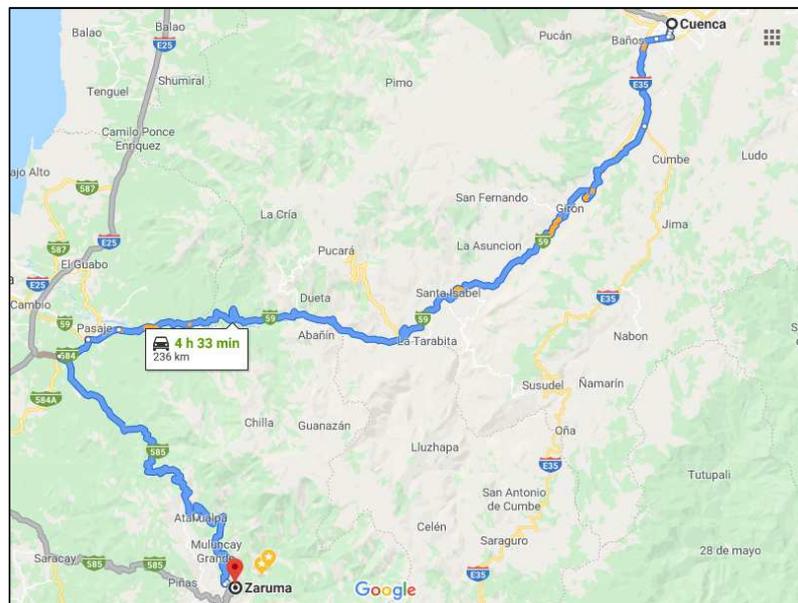


Figura 18. Ruta.(“de Zaruma a Cuenca - Google Maps,” n.d.)

La adquisición de datos se la realizo por medio del equipo construido antes mencionado que lo situó en una parte estratégica del bus.

2.5 Toma de datos.

Una vez construido el equipo se realizó las mediciones correspondientes en las rutas ya establecidas para las evaluaciones pertinentes se escriba de forma automática los archivos en formato .xls, y luego realizar las tabulaciones correspondientes, figura 19.

	A	B	C	D
1	X Y Z Unidad			
2	-1.29 0.39 10.04 m/s^2			
3	0.27 0.47 10.36 m/s^2			
4	-0.43 0.35 10.75 m/s^2			
5	-0.78 0.24 10.87 m/s^2			
6	0.82 0.63 10.28 m/s^2			
7	0.39 0.94 10.40 m/s^2			
8	-0.47 0.71 10.43 m/s^2			
9	0.12 0.75 10.28 m/s^2			
10	-0.63 0.86 10.32 m/s^2			
11	-0.78 0.35 10.63 m/s^2			
12	-0.98 0.04 10.40 m/s^2			
13	-1.18 0.75 9.85 m/s^2			
14	-1.80 0.39 9.89 m/s^2			
15	0.00 -0.27 9.61 m/s^2			
16	-1.18 0.16 10.16 m/s^2			
17	-0.59 0.71 9.92 m/s^2			
18	-1.14 0.47 10.36 m/s^2			
19	-0.71 0.27 10.94 m/s^2			
20	0.24 0.16 10.90 m/s^2			
21	0.31 1.10 10.55 m/s^2			
22	-0.04 1.57 10.43 m/s^2			

Figura 19. Datos obtenidos. Fuente: Autores.

2.6 Tabulación de los resultados obtenidos.

Para la tabulación de datos se realizó en un software Matlab debido a la gran cantidad de datos obtenidos en la ruta de servicio. Luego de analizar y procesar la información se obtiene los resultados correspondientes que se utilizan para las simulaciones posteriores del presente estudio.

2.6.1 Análisis de la distribución normal de los datos medidos.

La distribución de probabilidad continua más importante en todo el campo de la estadística es la distribución normal. Su gráfica, denominada curva normal, es la curva con forma de campana, figura 20, la cual describe de manera aproximada muchos fenómenos que ocurren en la naturaleza, la industria y la investigación. (Walpole, 2012)

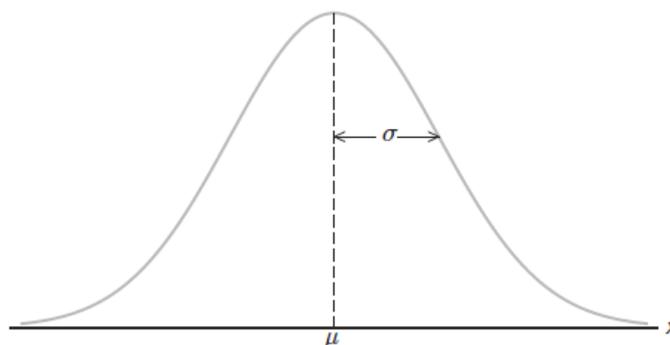


Figura 20. Curva Normal. (Walpole, 2012)

Como se muestra en la figura 21, se realizó el análisis de la distribución normal de los datos medidos adaptando a una variable aleatoria continua, la cual permite tomar cualquier valor de

aceleración medido dentro de la campana y puede ser utilizado en las simulaciones correspondientes debido a que los datos medidos poseen una distribución normal.

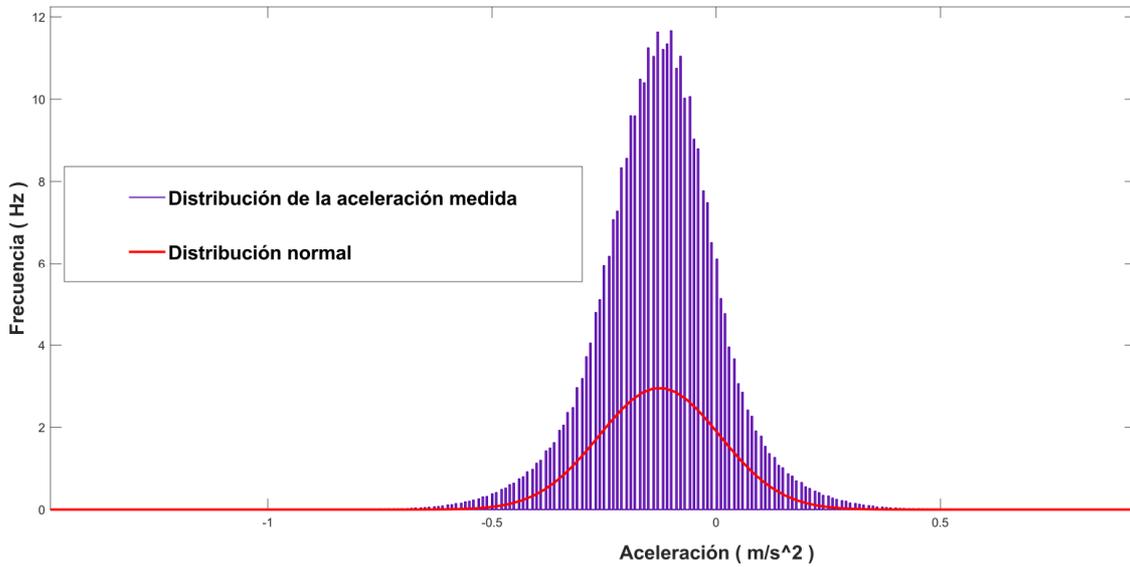


Figura 21. Distribución normal de los datos medidos. Fuente: Autores.

Todos los puntos de color verde representan los datos medidos de aceleración, si los puntos se encuentran cerca y dentro de la recta significa que los datos en realidad se distribuyen normalmente, en cambio los puntos que no están dentro de la recta no se distribuyen normalmente, figura 22.

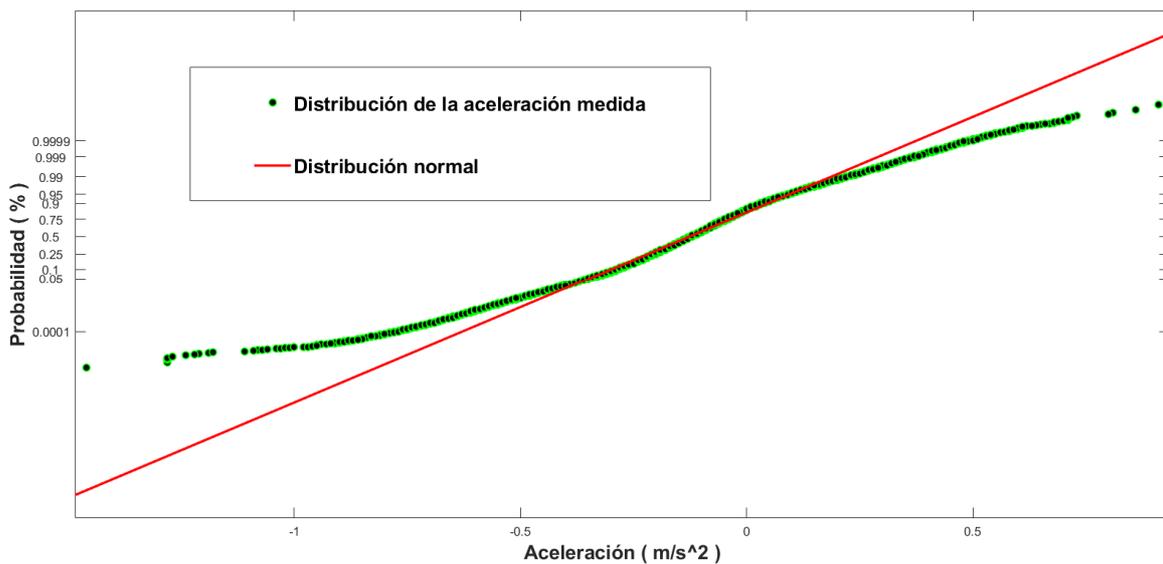


Figura 22. Grafica de probabilidad de la aceleración. Fuente: Autores.

2.7 Obtención de las funciones de aceleración.

En la figura 23 se muestran los valores de aceleración en el componente x medidos durante la ruta de servicio del bus, en la cual se puede apreciar las aceleraciones y desaceleraciones que se producen durante su recorrido.

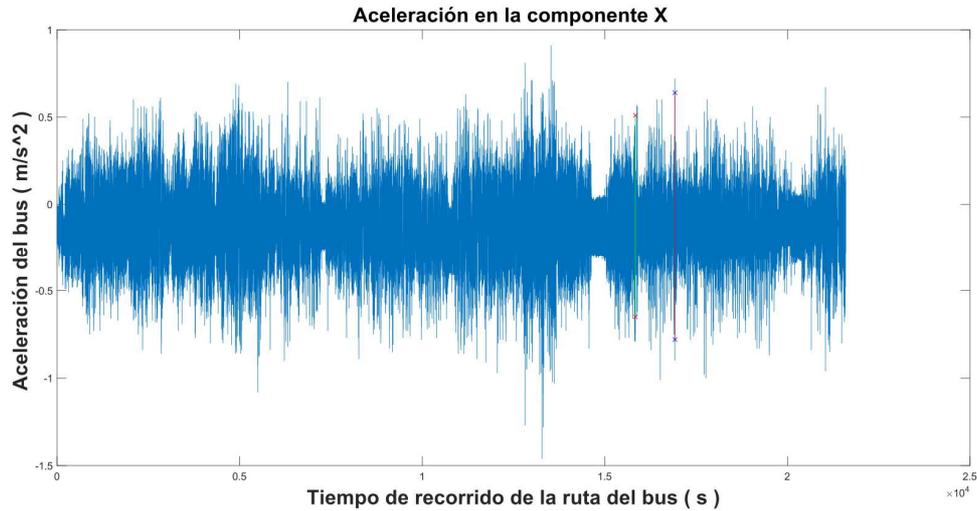


Figura 23. Aceleración en el eje X del bus durante su ruta de servicio. Fuente: Autores.

Con las mediciones de las aceleraciones en el eje x , y , z , se puede efectuar el análisis del comportamiento del bus producto del manejo por parte del conductor, es decir, analizar las aceleraciones y desaceleraciones obtenidas, para lo cual se obtiene la moda de los datos generados y se elige el valor que tiene mayor variación con respecto al siguiente para ajustarlo por medio de una recta la cual permite obtener la función de desaceleración, que en este caso es igual a $y = 3.66e^6 - 216 \cdot x$, ver figura 24.

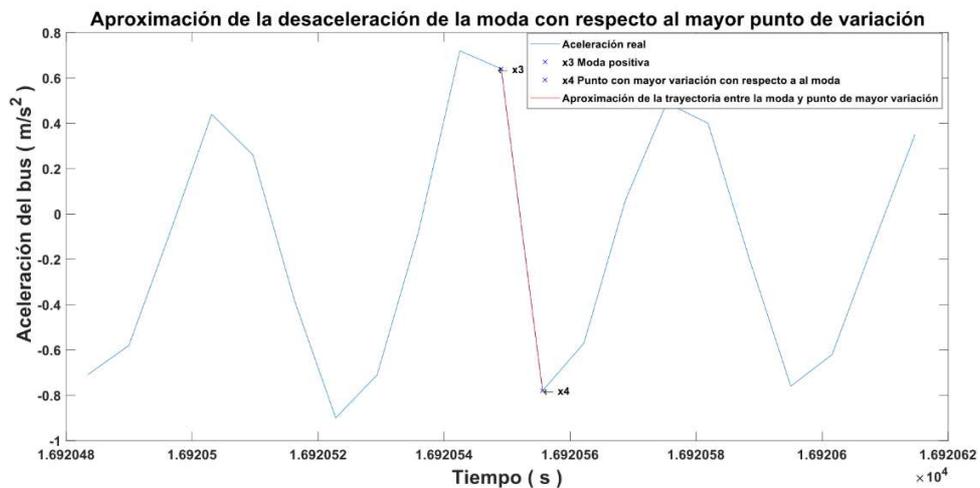


Figura 24. Aproximación de desaceleración del bus. Fuente: Autores.

En la figura 25 se muestra la obtención de la función de la aceleración, la cual se obtiene a partir de la moda de los datos inferiores, aplicando el procedimiento descrito en el apartado anterior se procede a obtener la función correspondiente, $y = 177 \cdot x - 2.8e^6$.

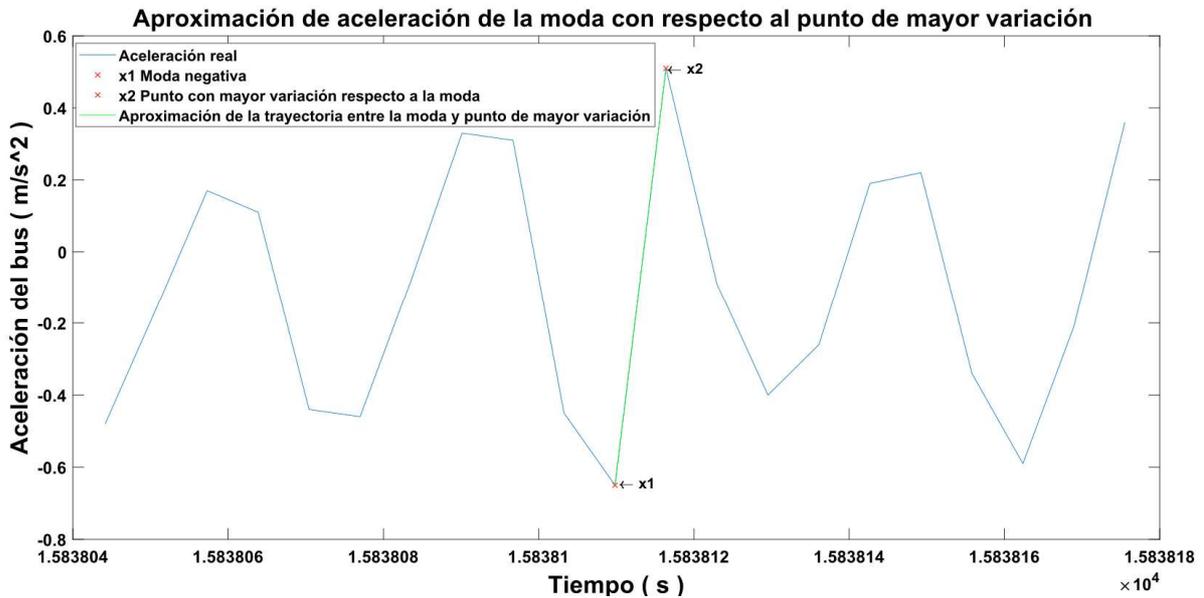


Figura 25. Aproximación de la función de aceleración en la componente x. Fuente: Autores.

- Para la componente en y se obtiene la función de la aceleración: $y = 163 \cdot x - 2.74e^6$.
- Para la componente en y se obtiene la función de la desaceleración: $y = 6.67e^5 - 155 \cdot x$.
- Para la componente en z se obtiene la función de la aceleración: $y = 128 \cdot x - 2.79e^5$.
- Para la componente en y se obtiene la función de la desaceleración: $y = 2.84e^6 - 297 \cdot x$.

2.7.1 Análisis de las ecuaciones de aceleración y desaceleración.

Para la elección de las ecuaciones necesarias para la simulación se tiene que considerar que debido a que la aceleración o desaceleración son dos fuerzas diferentes y cuando ocurre un choque frontal se origina una fuerza de desaceleración llamada tirón la cual se define como la tasa de cambio de la aceleración con respecto al tiempo. (Bueche & Hecht, 2007)

Para el presente estudio se escogió las ecuaciones de desaceleración de las componentes x, y, z, debido a que si se requiere acelerar de 0 a 90km/h conlleva un largo tiempo para un bus para pueda alcanzar altas velocidades, pero si un bus está viajando a 90 km/h y por un caso fortuito en ese momento necesita aplicar los frenos de manera inmediata y considerando que tiene pocos segundos para realizarlo, esto implica que la fuerza de desaceleración sería mayor.

Se debe considerar que el efecto de tirón genera movimientos a impulsos debido al aumento y disminución de la aceleración, por lo tanto, generan fuerzas adicionales a la carrocería que pueden producir algún tipo de deformaciones que se deben considerar en un análisis de impacto de la estructura del bus.

3. Análisis por medio de elementos finitos de la estructura del bus de transporte público.

3.1 Construcción del modelo de la carrocería.

Para la elaboración del modelo de la carrocería, figura 26, se procedió a realizar en el software SolidWorks con medidas reales del bus, lo cual permite que el ensayo virtual del modelo brinde confiabilidad en los resultados a obtener. Los elementos estructurales de la carrocería del modelo son de perfiles como lo exige la norma técnica ecuatoriana vigente presente dentro del país.

El diseño y construcción de carrocerías en el Ecuador para el transporte público interprovincial está normado y regulado por la Agencia Nacional de Tránsito y se fundamenta en las normas y reglamentos del Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización (INEN) que se disponen para el efecto y se especifican en la Norma INEN 1323: Revisión 2009 Vehículos Automotores. Carrocerías de Buses.(Manjarrés & Santillán, 2016)

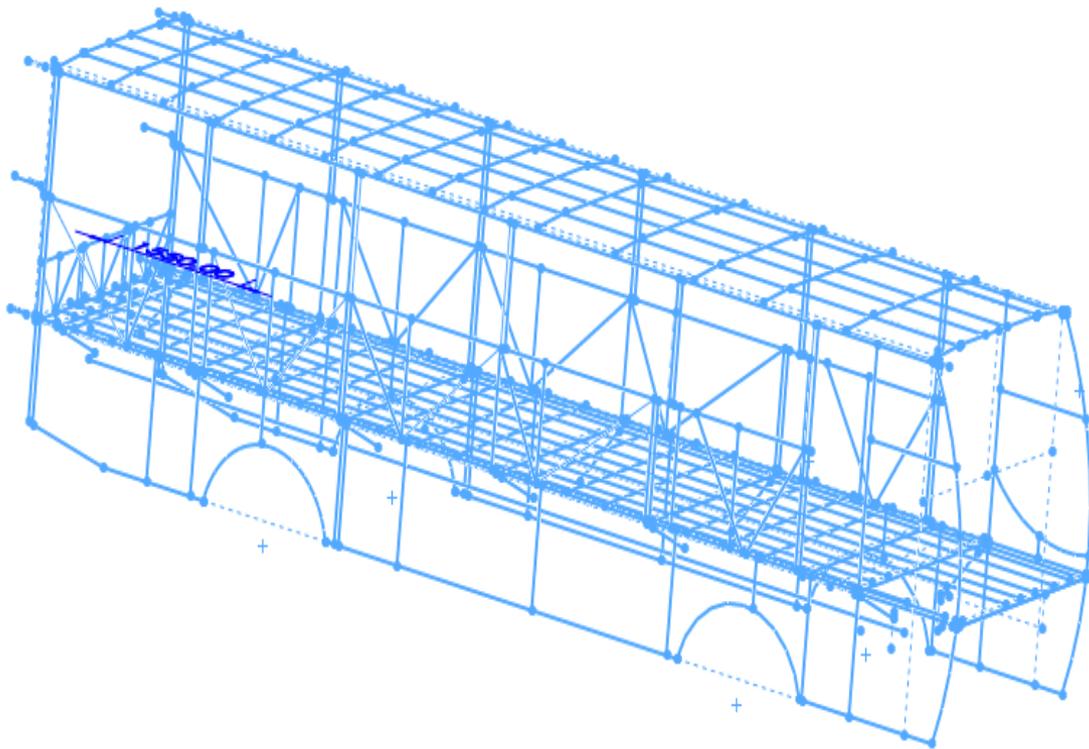


Figura 26. Modelado de la carrocería. Fuente: Autores.

3.1.1. Perfiles utilizados para construcción de carrocerías.

Es importante indicar que cada fabricante de carrocerías guarda la reserva de sus diseños y del tipo de material que utiliza para la construcción. La norma de construcción NTE INEN 1

323:2009, establece que el material a utilizar en la carrocería debe ser perfiles estructurales protegidos contra la corrosión que cumplan con las NTE INEN correspondientes.

En la Tabla 4, se indican los tipos de perfiles y materiales utilizados por empresas constructoras de carrocerías de vehículos para el transporte público. (Manjarrés & Santillán, 2016)

Tabla 4. Perfiles y materiales utilizado en carrocerías.

<u>Perfil</u>	<u>Material</u>	<u>Parte de la carrocería</u>
Canal U 100x50x2mm	ACERO GALVANIZADO	Piso+ Lat. Izq. + Lat. Der. + Techo
Canal U 25x50x2mm	ACERO GALVANIZADO	Refuerzo
Perfil Omega 2mm	ACERO GALVANIZADO	Refuerzo del techo
Plancha 1.5 mm	ACERO GALVANIZADO	Lat. Izq. + Lat. Der. (Refuerzo)
Tubo Cuadrado 40x40x2mm	ACERO GALVANIZADO	Piso+ Plataforma + Frente + Respaldo
Tubo Cuadrado 40x40x2mm	ACERO GALVANIZADO	Techo+ Lat. Izq. + Lat. Der. + Techo
Tubo Cuadrado 50x50x2mm	ACERO GALVANIZADO	Contravientos
Tubo Cuadrado 50x50x3mm	ACERO GALVANIZADO	Piso + Apoyos
Angulo 50x50x2mm	ACERO GALVANIZADO	Lat. Izq. + Lat. Der. (Faldón)
Curva R 80mm	ACERO GALVANIZADO	Piso + Lat. Izq. + Lat. Der. (Vértice)
Perfil 290x85x5mm	ACERO GALVANIZADO	Placas - Chasis
Perfil 30x50x255x50x2mm	ACERO GALVANIZADO	Lat. Izq. + Lat. Der. (Refuerzo)
Tubo Rectangular 100x50x2mm	ACERO GALVANIZADO	Lat. Izq. + Lat. Der. (Refuerzo)+ piso
Tubo Rectangular 100x50x2mm	ACERO GALVANIZADO	Piso

Fuente: (Manjarrés & Santillán, 2016)

3.1.2. Materiales utilizados para construcción de carrocerías.

En carrocerías se utiliza generalmente el acero con la denominación: ASTM A500 galvanizado. Las propiedades se señalan en la Tabla 5 y 6.

Tabla 5. Propiedades del Acero ASTM A500

<u>Composición Química</u>	<u>Valor</u>	<u>Unidad</u>
C (Carbón)	0.30	%
Cu (Cobre)	0.18	%
Fe (Hierro)	99.0	%
P (Fósforo)	0.050	
S (Azufre)	0.063	%

Fuente:(AHMSA, 2013)

Tabla 6. Propiedades del Acero ASTM A500

<u>Propiedades Mecánicas</u>	<u>Valor</u>	<u>Unidad</u>
Limite elástico	250	MPa
Densidad	7.85	g/cc
Módulo de corte	80	GPa
Módulo de Young	200	GPa
Módulo de volumen	140	GPa
Resistencia a la Tracción	310	MPa
Rendimiento de resistencia a la tracción	230	MPa
Elongación	25	% deformación
Módulo de ruptura	405	MPa

Fuente:(AHMSA, 2013)

3.1.3. Dimensiones del bus.

En la norma técnica ecuatoriana establece las dimensiones del bus que deben cumplir los vehículos de transporte público de pasajeros intrarregional, interprovincial e intraprovincial, tabla 7, con la finalidad de proteger la vida y la seguridad de los pasajeros, el ambiente y la propiedad, y prevenir prácticas engañosas que puedan inducir a error a los fabricantes o usuarios finales. NTE INEN 1668:2015(INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, 2016)

Tabla 7. Dimensiones del Bus

<u>Dimensiones</u>	<u>Tipo de vehículo</u>	<u>Numero de ejes</u>
Largo total [mm]	10 250 a 13 300	Bus
Ancho total [mm]	2500 a 2600	Bus
Altura máxima [mm]	4100	Bus

Fuente:(INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, 2016)

En la figura 27 se aprecia la dimensión de la carrocería del bus interprovincial, así como la longitud total del bus que es de 10783 mm, su ancho de 2537 mm y su altura que es de 2847 mm. Al modelo se lo debe colocar los accesorios, asientos, ventanas, debe ser montado en el chasis, etc., lo que modifica sus dimensiones, pero cumple con lo que exige la normativa ecuatoriana vigente.

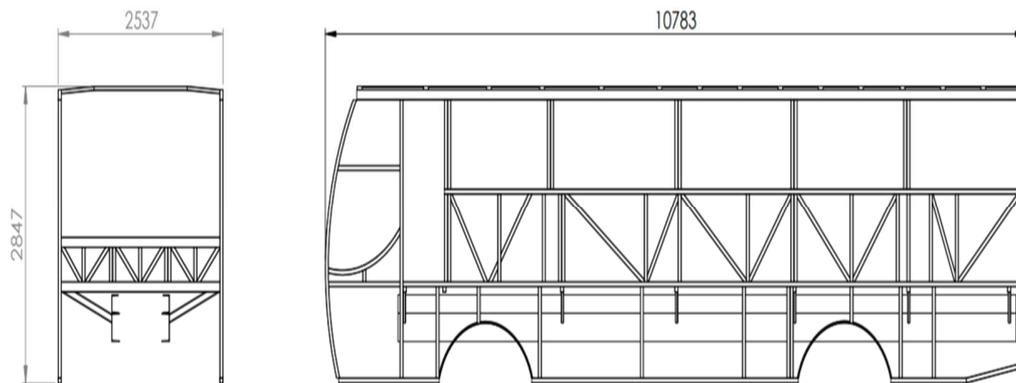


Figura 27. Dimensiones de la carrocería en mm. Fuente: Autores.

3.1.4. Superestructura del autobús.

Por lo general una superestructura del autobús se divide en 6 partes o sub-ensamblajes, figura 28, estas se muestran en una perspectiva explosionada de cómo está conformada la superestructura, es decir; panel frontal, panel trasero, paneles de ambos laterales, panel del suelo o piso y bodega de carga y panel del techo. Existen diferencias entre los laterales debido a la presencia de las puertas de acceso solo en uno de los laterales. (Murillo Martínez, 2018)

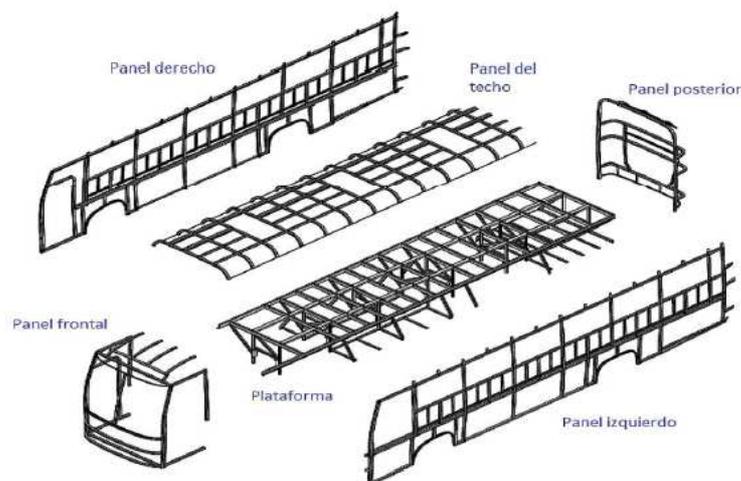


Figura 28. Paneles que conforma la superestructura. (Moreno-Zulca, Llanes-Cedeño, Guaña-Fernández, & Jima-Matailo, 2020)

En la tabla 8, se muestra los tipos de perfiles que se utilizan para la construcción de cada uno de los paneles, es decir panel frontal, panel trasero, paneles laterales, panel del suelo o piso, bodega de carga y panel del techo que conforman la superestructura, figura 29. Además, en la tabla 8 indicada se presenta la disposición de la perfilaría de la carrocería modelada en el software computacional, la cual se ocupa para las posteriores simulaciones, que a diferencia de la tabla 4 la cual muestra los perfiles ocupados de manera general por todas las empresas carroceras.

Tabla 8. Disposición de Perfilaría de la Carrocería del Bus

<u>Perfil</u>	<u>Material</u>	<u>Parte de la carrocería</u>
<i>Perfil Omega 5mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Izquierdo y Derecho</i>
<i>Tubo Rectangular 40x80x2mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Izquierdo y Derecho</i>
<i>Tubo Rectangular 50x100x2mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Izquierdo y Derecho</i>
<i>Tubo Cuadrado Curva R 100mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Izq. Y Der. Curva R 100mm</i>
<i>Tubo Cuadrado 50x50x2mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Izquierdo y Derecho</i>
<i>Tubo Rectangular 100x40x2mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Techo</i>
<i>Tubo Rectangular 80x40x2mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Techo</i>
<i>Tubo Rectangular 50x100x2mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Techo</i>
<i>Tubo Rectangular 50x100x5mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Piso</i>
<i>Canal C 50x25x10x3mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Piso</i>
<i>Tubo Cuadrado 50x50x2mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Piso</i>
<i>Canal C 100x175x10x3mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Piso</i>
<i>Tubo Rectangular 50x100x2mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Trasero</i>
<i>Tubo Cuadrado 50x50x2mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Trasero</i>
<i>Tubo Rectangular 80x40x2mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Trasero</i>
<i>Tubo Rectangular 80x40x2mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Frontal</i>
<i>Tubo Cuadrado 50x50x2mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Frontal</i>
<i>Tubo Rectangular 50x100x2mm</i>	<i>ACERO GALVANIZADO</i>	<i>Panel Frontal</i>

Fuente: Autores.

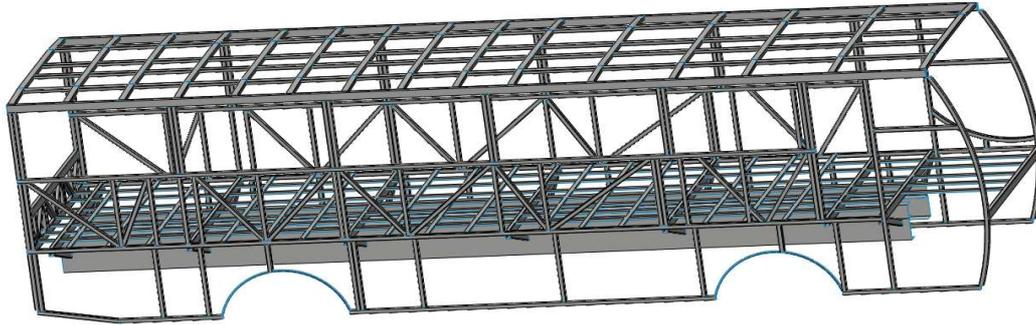


Figura 29. Modelo y perfiles de la carrocería. Fuente: Autores.

3.2 Condiciones de contorno.

En las condiciones de contorno o frontera son utilizadas para resolver problemas de ingeniería además son valores de variables que se establecen como constantes a lo largo de la evolución del sistema y por tanto limitan su comportamiento. Estas condiciones hacen referencia a fuerzas, tensiones aplicadas al modelo, así como velocidad que se puede dar al objeto de estudio, restricciones de movimiento de este. (Murillo Martínez, 2018)

3.2.1 Masa distribuida del modelo.

La masa que esta aplica en la carrocería del bus en la simulación es de 2001 kg, este valor es solo de la carrocería no se toma en cuenta todos los accesorios que conforman el bus tales como pasajeros, asientos, motor, sistemas de suspensión, frenos, dirección, transición, etc. Este valor de masa que contempla todos los elementos indicados está alrededor de 10000kg, los cuales por la complejidad en el modelado no se consideran debido al tiempo que toma para su realización, así como el gasto computacional que conllevaría la simulación.

3.2.2 Velocidad inicial.

La velocidad con la cual se procede a realizar el al impacto frontal es de 90 km/h, se tomó esta velocidad como referencia debido a que se estable en el reglamento a la Ley de Transporte Terrestre Transito y Seguridad Vial establecido en el Ecuador.

3.2.3 Material de la estructura.

Se debe considerar las propiedades de la zona plástica debido a que se va a realizar un impacto frontal lo cual hace que se deforme el material y pasa de la zona elástica a la zona plástica haciendo que se trabaje en la zona plástica del material.

3.3 Simulación mediante elementos finitos.

En el campo de la simulación y análisis de impactos tiene como fin de estudiar las características de deformación del material y diseño, así mismo la seguridad del mismo ante un accidente que en donde se puede analizar la deformación de la carrocería, la energía que absorbe la estructura como la del material con el que se construyó la misma y presentar mejoras dentro de su campo

de aplicación.(Simulación de un choque frontal diferentes tipos de barrera proyecto fin de carrera ingeniería técnica industrial, 2009)

Para la simulación del presente estudio se va a realizar dos tipos de pruebas “A” y “B”, la prueba “A” consiste en realizar la simulación de impacto frontal sin valores de aceleraciones y a una velocidad constante. La prueba “B” se realiza con las condiciones iniciales de la prueba “A” más las aceleraciones medidas durante la ruta de servicio del bus.

3.3.1 Especificación de las propiedades del material.

Una vez realizado el modelo de la carrocería en el software SolidWorks, y preparar la geometría de posibles imperfecciones que se presentaran después de realizar el diseño, se asigna el material que para este caso es acero galvanizado y concreto para la carrocería del bus y la pared de impacto respectivamente.

En la figura 30, se muestran las propiedades mecánicas del concreto que se va a utilizar para la pared donde se procederá a impactar la carrocería.

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus a...		
6	Young's Modulus	3E+10	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,18		
8	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	
10	Tensile Pressure Failure			

Figura 30. Propiedades mecánicas del concreto. Fuente: Autores.

La figura 31, muestra las propiedades mecánicas del acero galvanizado, además se asigna propiedades de la zona plástica del material que se va a utilizar para la carrocería del bus para la simulación de impacto frontal.

Properties of Outline Row 4: Structural Steel NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus a...		
6	Young's Modulus	2E+11	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
10	Bilinear Isotropic Hardening			
11	Yield Strength	250	MPa	
12	Tangent Modulus	1450	MPa	
13	Specific Heat, C _p	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹	

Figura 31. Propiedades mecánicas del acero galvanizado. Fuente: Autores.

3.3.2 Generación de la malla para el modelo.

El mallado consiste en generar un modelo matemático del problema, en base a toda la información que se ha ingresado al software, para la simulación. Un software de elementos finitos únicamente utiliza la malla que se ha generado del problema, quedando la geometría CAD únicamente como referencia.(SANTOS CORREA, 2018)

Una vez cargado los materiales con sus respectivas propiedades se procede a generar la malla del sistema, así como las condiciones iniciales a las que se va a someter la carrocería del presente estudio.

En las características del mallado se realiza en base a estudios realizados con características similares, en donde se analiza la calidad de la malla para determinar la más adecuada y de esta manera se garantiza la convergencia del método aplicado. En la figura 32, se muestra el mallado de la carrocería.

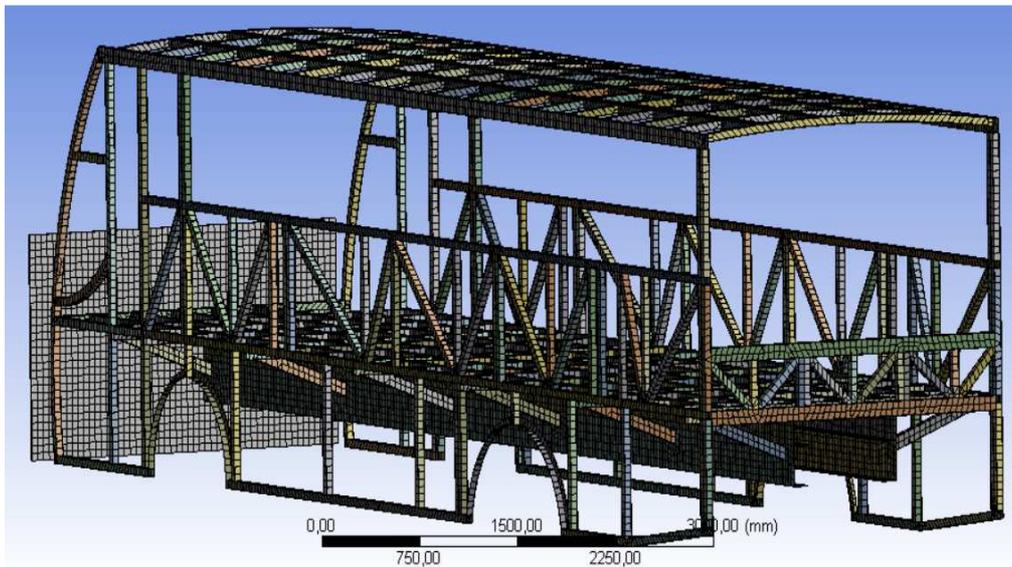


Figura 32. Generación de la malla de la estructura. Fuente: Autores.

3.3.3 Análisis de la calidad de la malla.

Para evaluar la calidad de malla que se utiliza dentro de las herramientas que ofrece ANSYS para evaluar el criterio de malla se encuentran:

- ✓ Warpage
- ✓ Jacobiano
- ✓ Skewness
- ✓ Element Quality
- ✓ Aspect Ratio
- ✓ Warping Factor
- ✓ Parallel Deviation
- ✓ Máximum Corner Angle

✓ Orthogonal Quality

Esto se definen mediante parámetros geométricos propios de cada uno de los elementos, por lo general si uno de estos parámetros ha fallado en un elemento, también fallarán todos los demás, por el contrario, si un parámetro se encuentra bien calificado, estarán en la misma condición todos los demás, por este motivo no hace falta analizar a todos los parámetros sino solamente los principales.(Santos correa, 2018)

3.3.3.1 Warpage.

Es la medida del ángulo formado entre los dos planos que se obtiene al dividir un cuadrilátero por una sus diagonales, el proceso se repite nuevamente para la segunda diagonal y se hace una comparación entre ambas para verificar cual es la peor medida, esta se muestra al final para cada elemento.(Santos correa, 2018)

3.3.3.2 Jacobiano.

Es la medida de la desviación de un elemento dado de su forma original. Por ejemplo, para cuadrados se espera que todos sus ángulos sean de noventa grados, mientras que, para triángulos, se espera que todos sus ángulos sean de sesenta grados. El Jacobiano de un elemento se evalúa con valores entre uno y menos uno, donde uno corresponde a un elemento perfecto.(Santos correa, 2018)

Esta relación o criterio permite conocer la calidad de malla que presenta la estructura de la carrocería figura 33, al contar con una proporción próxima a 1, esto indica que los resultados a obtener en la simulación son fiables. Para obtener la relación Jacobiana de 1, las caras opuestas de los perfiles estructurales deberían ser todos paralelos entre sí.

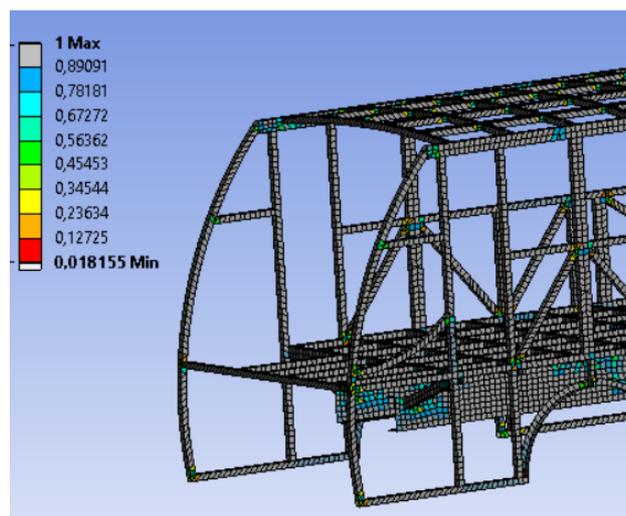


Figura 33. Jacobiano de los elementos del bus. Fuente: Autores.

3.3.3.3 Skewness.

En elementos triangulares se calcula este valor, obteniendo el ángulo mínimo que se forma entre las líneas que unen a los nodos de cada elemento, con la parte media del lado opuesto. Se reporta la diferencia entre noventa grados, menos el menor ángulo medido. Para elementos de tipo cuadrilateral, se calcula este valor, obteniendo el ángulo mínimo formado entre las líneas que unen las partes medias de los lados opuestos de cada lado, se reporta la diferencia entre noventa grados, menos el menor ángulo medido. (Santos correa, 2018)

Lo ideal para una calidad de malla es que el valor de Skewness se aproxime a 0, en cambio si este valor es mayor a 1 se considera una malla de mala calidad. En el caso del presente estudio el valor máximo obtenido es de 0.99996, que de acuerdo con el criterio de evaluación es aceptable, figura 34.

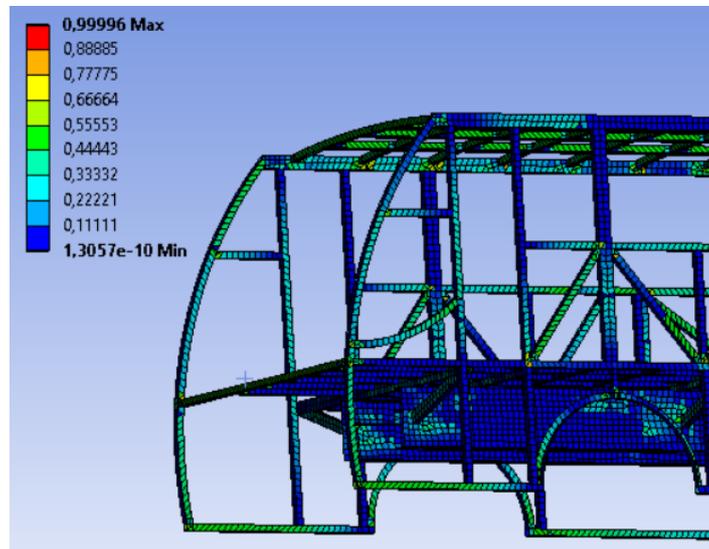


Figura 34. Gráfico estadístico de la calidad de malla. Fuente: Autores.

3.3.4 Condiciones iniciales.

Se estable las condiciones iniciales en el software antes de ejecutar la simulación, en donde se debe mostrar los nodos que permanecen fijos y los que tendrán movimiento durante todo el proceso de estudio, es decir que esta sección se da la característica a la pared donde se impactará el bus, además la velocidad de viaje de la estructura del bus a la que va a estar sometida para como objeto de análisis cuando se produzca el impacto frontal.

En la figura 35 se muestra las condiciones que va tener la pared, es decir es un soporte fijo que no cambiara su posición y no sufre deformación durante el tiempo de simulación debido a que es una barrera rígida.

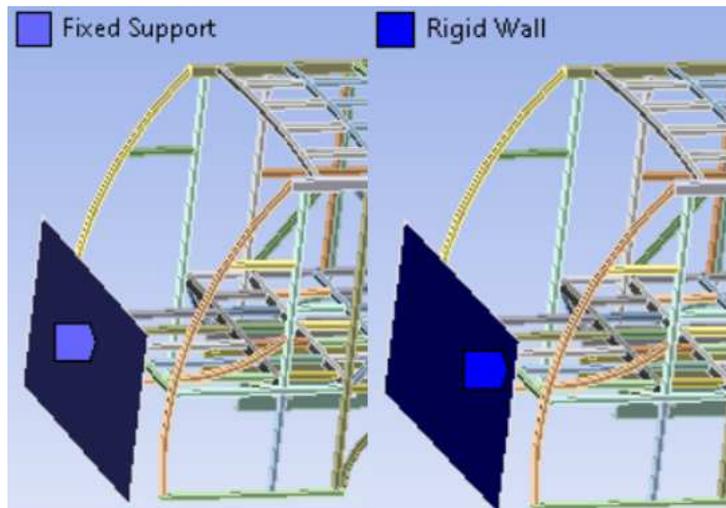


Figura 35. Condiciones de borde de la pared. **Fuente:** Autores.

Se asigna al modelo de la carrocería una velocidad de desplazamiento lineal de 25000 mm/s que corresponde a 90 Km/h, velocidad que es permitida circular a los buses de servicio interprovincial. En las normas internacionales de impactos frontales establecen en su normativa UNECE 33, una velocidad de 54 Km/h, pero en el presente estudio se establece la velocidad máxima con la que se permite circular a nivel nacional con la finalidad de analizar a qué condiciones va a estar sometida presente estructura cuando se da un impacto, figura 36.

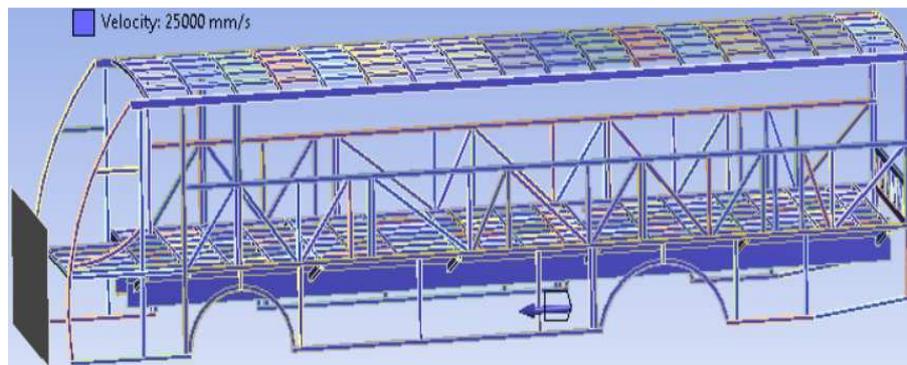


Figura 36. Condiciones de la carrocería velocidad. **Fuente:** Autores.

3.3.5 Tiempo de ensayo.

En diferentes estudios de impacto similares que se han realizado los tiempos promedio de programación están entre 100 ms y 150 ms, siendo los primeros 70ms los más críticos del estudio cuando se dan los picos de liberación de energía disipada.

Se dispuso un tiempo de duración con referencia a estudios anteriores, utilizando un tiempo de ensayo de 150 ms, que servirán para evaluar todo el impacto frontal al que va a someterse la carrocería. No se debe exceder estos tiempos ya que el ordenador va a perder tiempo de cálculo sin ganar ningún resultado notable o importante.

3.4 Resultados del análisis del modelo realizado prueba A.

En el análisis de los resultados se pueden obtener los esfuerzos máximos y mínimos que se generan al momento de realizar un impacto, las zonas más críticas que se presentan en la estructura, así como la energía que absorbe la carrocería, esto con la finalidad de poder hacer correcciones o mejoras en el diseño.

3.4.1 Esfuerzo de Von Mises.

El límite elástico del material galvanizado es de 250MPa . Como se puede observar en la figura 37, el esfuerzo máximo durante el impacto es de 546MPa . Para las condiciones simuladas, se aprecia que las zonas de mayor riesgo de daño son las uniones de los perfiles.

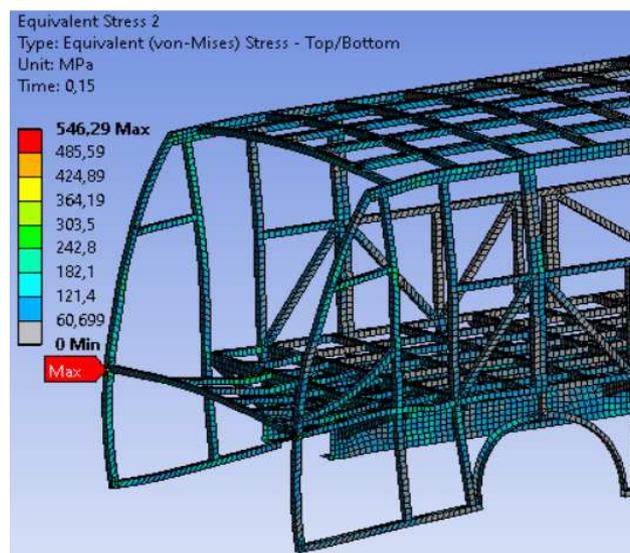


Figura 37. Esfuerzo equivalente de Von Mises. **Fuente:** Autores.

3.4.2 Deformación.

El comportamiento de la estructura en la cabina del conductor tiene una deformación que invade el espacio de supervivencia de la carrocería, como se muestra en la figura 38. Debido al contacto entre la pared y la estructura frontal genera una penetración en la estructura de 214cm, lo cual genera un alto riesgo de daño al conductor. Además, el material de la estructura paso de la zona elástica a la zona plástica, dando como resultado que la estructura quede deformada permanentemente generando un riesgo a la integridad física del conductor.

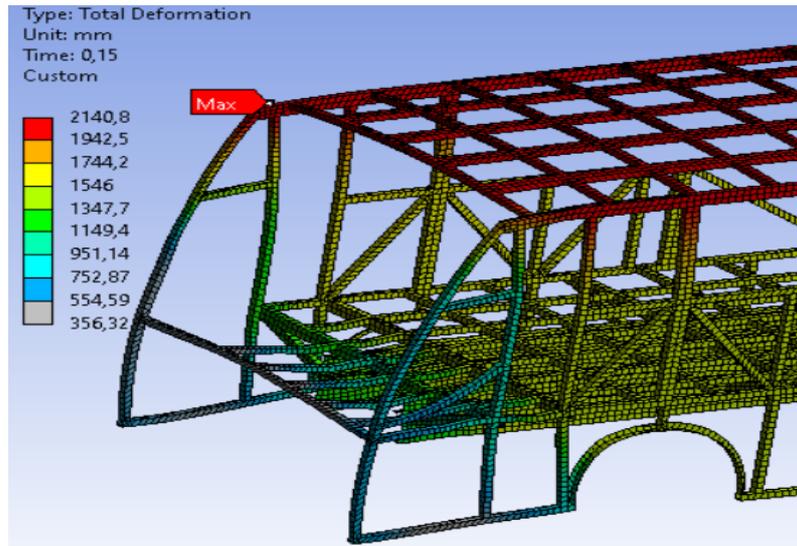


Figura 38. Deformación de la carrocería. Fuente: Autores.

Como se muestra en la figura 39, se obtiene la curva de deformación en dirección Z, longitudinal a la dirección de movimiento del bus versus tiempo, en el inicio de la curva se observa que en un tiempo de 20 milisegundos se obtiene una deformación máxima de 21 cm, y para un tiempo de 60 milisegundos se obtiene una deformación de 8 cm mientras transcurre el tiempo de simulación la deformación tiende a estabilizarse o ser constante.

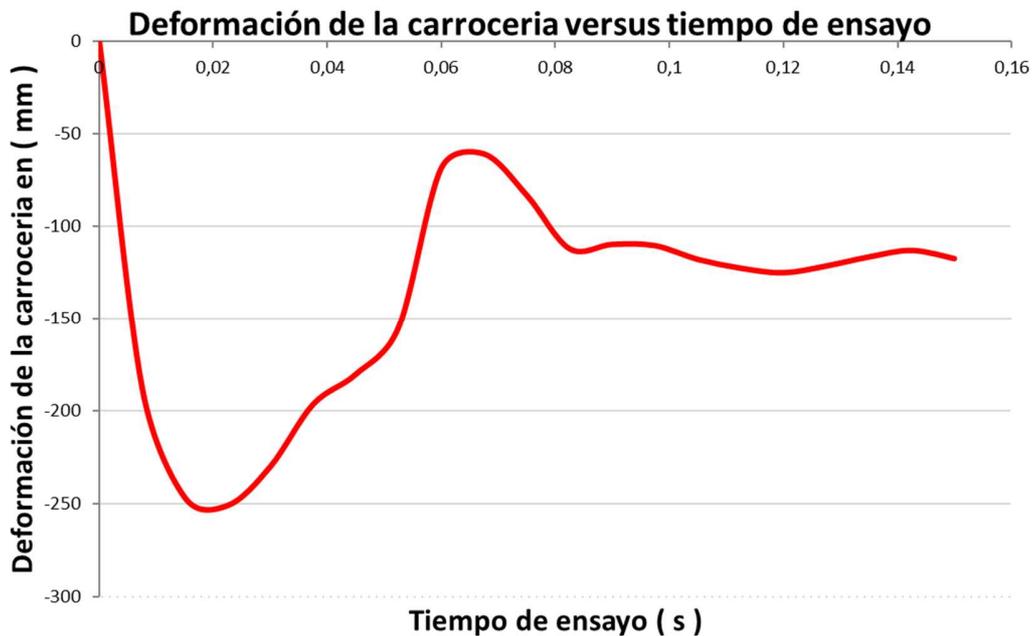


Figura 39. Deformación de la carrocería versus tiempo de ensayo. Fuente: Autores.

3.4.3 Balance de energía.

En el tiempo 0.00975 *seg* empieza el impacto entre la pared y el bus con una energía interna de $9.076e^{05} \text{ mJ}$ y una energía cinética $6.8e^{08} \text{ mJ}$. La duración del impacto es 0.055 s y en este evento la energía interna pasa a tener $2.93e^{08} \text{ mJ}$ y la energía cinética desciende a $2.89e^{08} \text{ mJ}$. Al finalizar la simulación en el tiempo 0.15 s la energía interna termina con $5.68e^{08} \text{ mJ}$ y la cinética $7.49e^{06} \text{ mJ}$, figura 40.

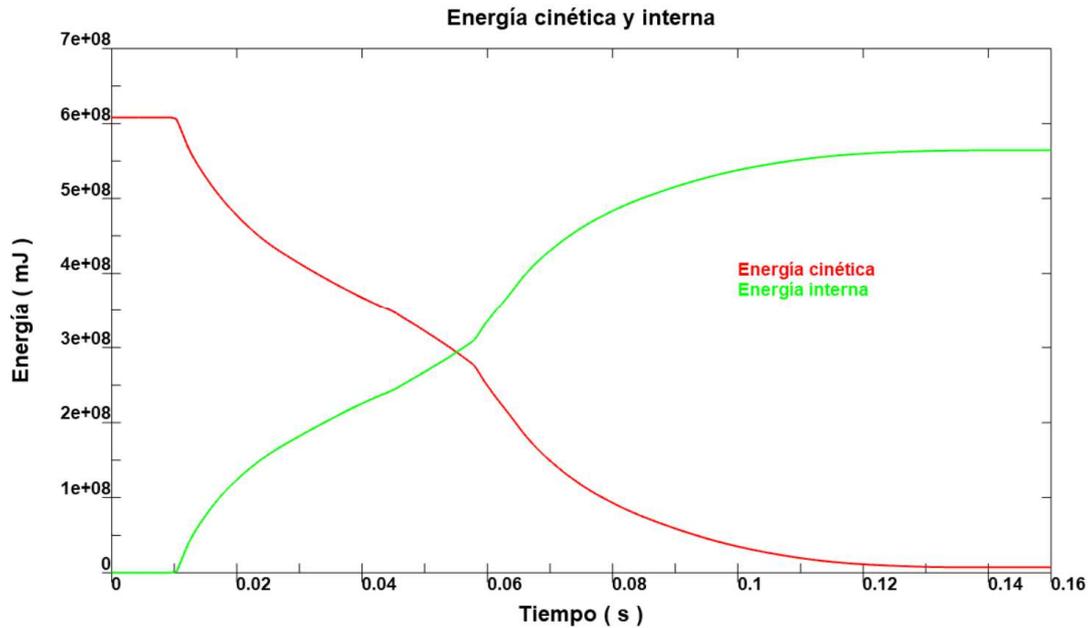


Figura 40. Energía cinética e interna en (mJ). Fuente: Autores.

La energía cinética, ecuación (1), se define como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa dada desde el reposo hasta su velocidad establecida.

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2$$

Donde,

$$E_c = \text{Energía cinética (Joules)}. \quad (1)$$

$$m = \text{masa en kg.}$$

$$v = \text{velocidad en } \frac{m}{seg}.$$

$$E_c = \frac{1}{2} * 2001 * 25^2$$

$$E_c = 6.25e^5 J$$

La energía cinética calculada es de $6.25e^5 J$ y la simulada es de $6.08e^5 J$ lo que representa un error del 3% y es aceptable.

Post impacto, la energía cinética pasa a ser interna y lo cual se tiene un 7% de diferencia con la energía cinética inicial.

Toda la energía cinética del bus al momento del impacto debe ser disipada por la estructura en forma de deformación de sus elementos constitutivos. Se observa que, mientras la energía total permanece constante, la energía cinética decae totalmente en el tiempo de 60 ms. Por lo contrario, mientras esta va en descenso, la energía interna del sistema aumenta súbitamente, formando un entrecruzamiento que denota como ocurre la transformación de energía figura 41.

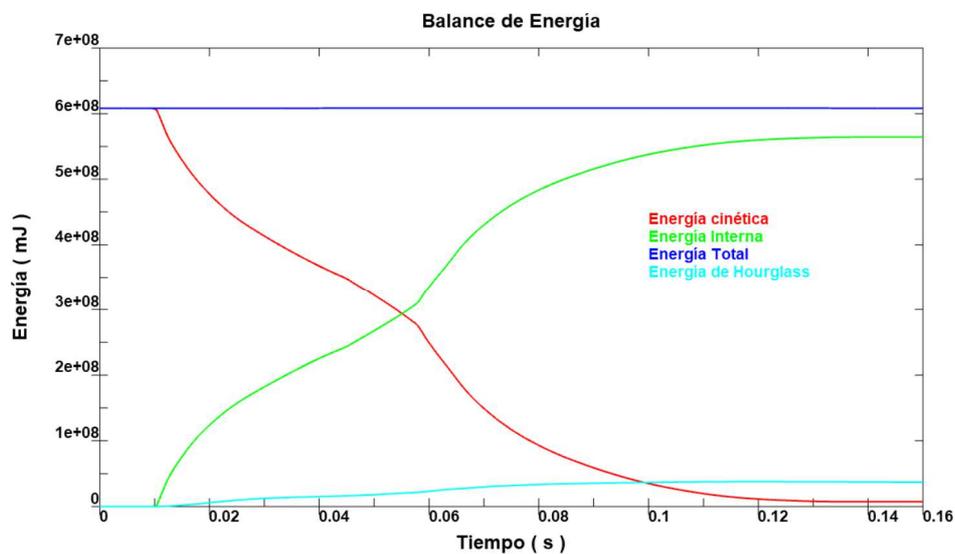


Figura 41. Balance de energía en (mJ). Fuente: Autores.

3.4.4 Validación del Estudio.

Para la confirmación de este ensayo computacional se requiere construir una carrocería de un bus interprovincial y realizar las mismas pruebas con las condiciones aplicadas en el método de elementos finitos, lo cual conllevaría una inversión costosa. Por lo expuesto para la validación de este estudio se aplica el método de la energía de Hourglass.

3.4.4.1 Validación Mediante el Método de Energía de Hourglass.

Los componentes energéticos no físicos introducidos mediante el proceso de modelación matemática (por ejemplo, Hourglass y amortiguamiento interno) no excederán en ningún momento del 5 % de la energía total. (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE), 2015)

La figura 42, muestra la curva de la energía total obtenida del sistema la cual tiene un valor $6.10e^{08} \text{ mJ}$, esta energía ha sido absorbida en zona elástica y plástica del material utilizado en la carrocería. La energía de Hourglass tiene un valor de $2.52e^{07} \text{ mJ}$.

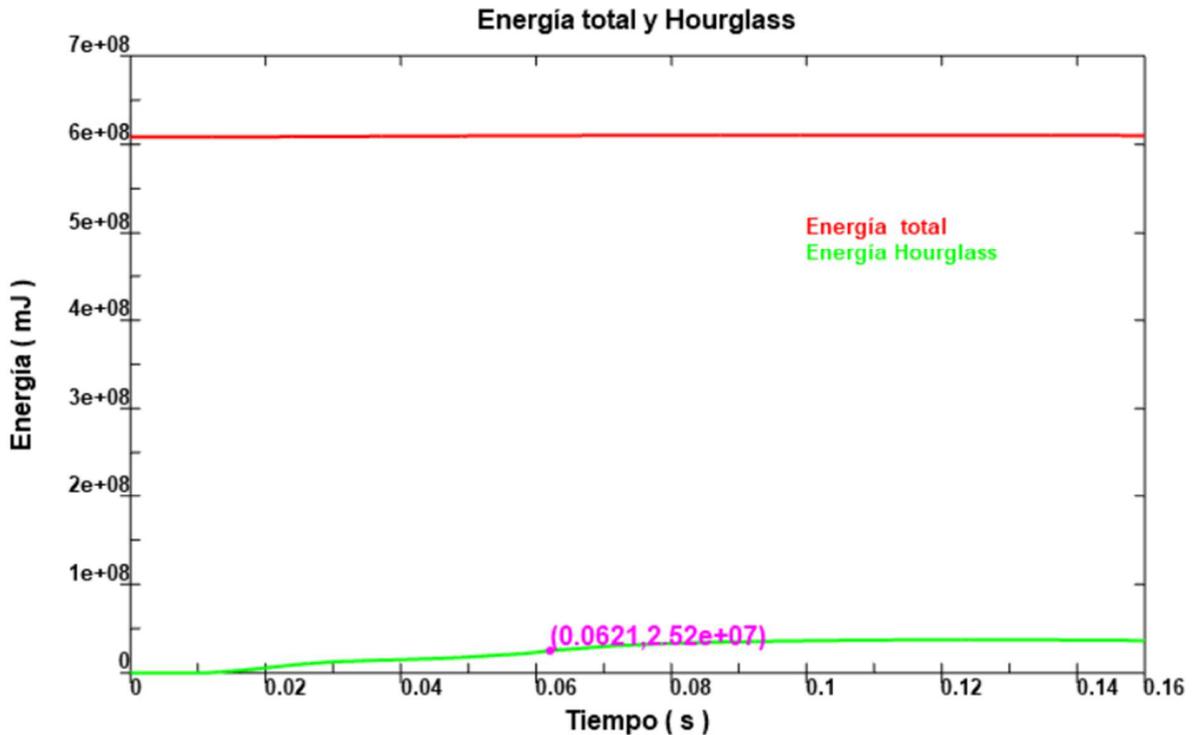


Figura 42. Energía Total y Hourglass. Fuente: Autores.

Para la validación se ocupa la ecuación (2), donde se relaciona el valor de la energía total con el valor de la energía de Hourglass, la cual no debe superar el 5 %.

$$H = \frac{\text{Hourglass Energy}}{\text{Total Energy}} * 100\% \quad (2)$$

$$H = \frac{2.52e^{07} \text{ milijoules}}{6.10e^{08} \text{ milijoules}} * 100\%$$

$$H = 4.13 \%$$

El resultado de la relación ($H = 4.13 \%$) entre la energía de Hourglass $2.52e^{07} \text{ mJ}$ y la energía total $6.10e^{08} \text{ mJ}$ es menor al 5 %, por lo tanto, el análisis es válido para las condiciones establecidas en el reglamento ECE R66 y para este estudio.

3.5 Resultados del análisis del modelo realizado prueba B.

Para realizar la simulación de la prueba “B” se utilizó las condiciones establecidas en la prueba “A” y se añadió la aceleración medida para analizar los efectos de una colisión del bus de transporte público en una ruta de servicio.

3.5.1 Esfuerzo de von mises.

En la figura 43, indica el esfuerzo máximo durante el impacto que es de 584 MPa para las condiciones establecida para la prueba “B”, en donde las zonas críticas son las uniones de los perfiles, además permite determinar el esfuerzo total existente sobre cada miembro estructural que conforma la carrocería del bus.

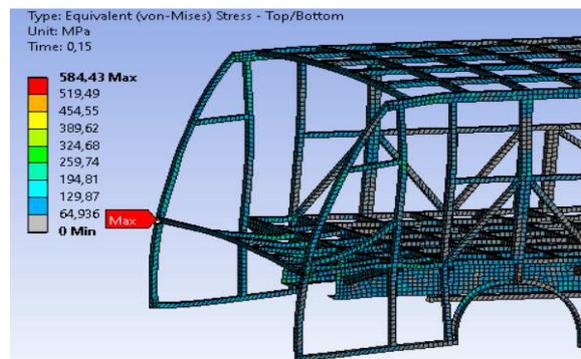


Figura 43. Esfuerzo de Von-Mises. Fuente: Autores.

3.5.2 Deformación de la estructura.

La deformación total de la estructura es de 2510 mm en la prueba “B”, con respecto a la deformación de la prueba “A” existe una deformación de 370 mm figura 44.

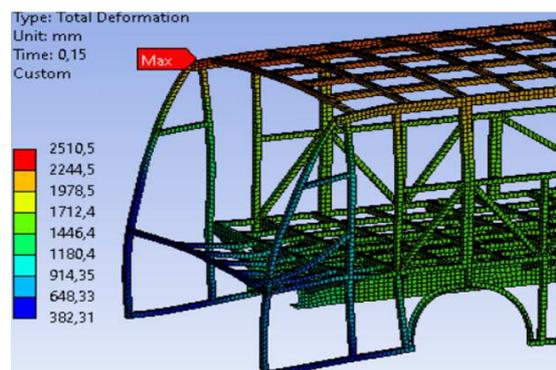


Figura 44. Deformación de la carrocería. Fuente: Autores.

Como se muestra en la figura 45, la deformación en dirección Z, longitudinal a la dirección de movimiento del bus se obtiene la curva de deformación versus tiempo, donde al inicio de la curva se observa que en un tiempo de 20 milisegundos se obtiene una deformación máxima de

25 cm, y para un tiempo de 60 milisegundos se obtiene una deformación de 12 cm mientras transcurre el tiempo de simulación la deformación tiende a estabilizarse o ser constante.

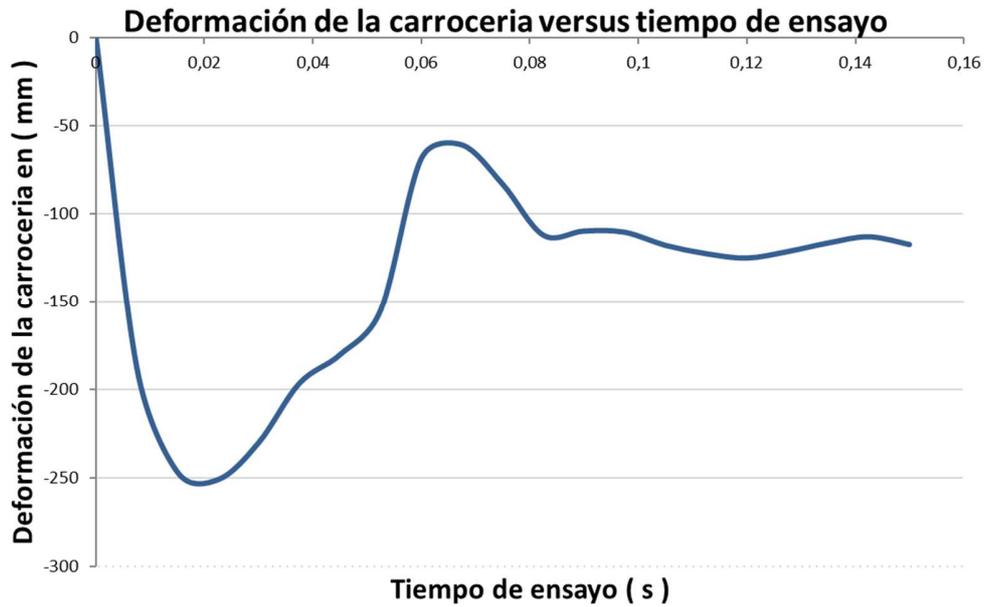


Figura 45. Deformación de la carrocería versus tiempo. Fuente: Autores.

3.5.3 Balance de energía.

La energía interna termina en $5.64e^{08} \text{ mJ}$ y la energía cinética tiene un mínimo de $7.39e^{06} \text{ mJ}$ formando un entrecruzamiento que denota como ocurre la transformación de energía, figura 46.

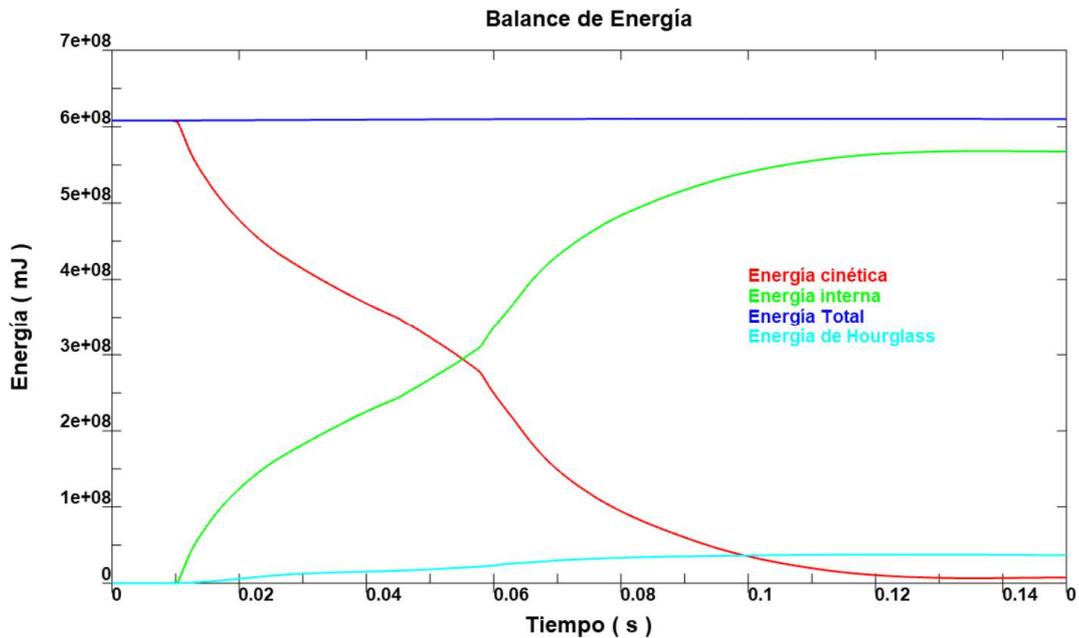


Figura 46. Balance de energía mj. Fuente: Autores.

3.5.4 Validación Mediante el Método de Energía de Hourglass.

El resultado de la relación ($H = 4.47\%$) entre la energía de Hourglass que es de $2.72e^{07} \text{ mJ}$ y la energía total de $6.08e^{08} \text{ mJ}$ es menor al 5 %, por lo tanto, el análisis es válido para las condiciones establecidas en la simulación de este estudio.

4. Resultados.

4.1 Construcción del modelo.

- Para la realización del presente estudio se tomó las medidas reales de una carrocería, así como la disposición de los perfiles en base a las mediciones obtenidas, para luego dibujar la carrocería en un modelo CAD con las dimensiones de los elementos considerando los mínimos detalles para que el modelo computacional sea exactamente igual al modelo real, debido a que pequeños errores al momento de modelar pueden generar fallos en las simulaciones del presente estudio.
- Una vez diseñado el modelo de la carrocería del bus, el cual se realizó con las medidas de un bus real construido, posteriormente se realiza la modificación de las propiedades del material y los tipos de perfiles que forma el modelo de la superestructura con el fin de obtener resultados aproximados a la realidad durante un siniestro de tránsito en un bus de transporte público.
- Se tiene que considerar la distancia de la pared rígida con respecto a la geometría de la carrocería esta tiene que estar lo más cerca posible, de esta manera el tiempo de simulación va a ser menor ya que no se va a estar calculando en espacios vacíos.
- Otro punto importante que se debe considerar para el diseño de la pared rígida es su altura que es de 1.5 m, ya que en estudios similares recomienda esta altura de la pared.

4.2 Pre Procesamiento.

- La adquisición de datos de aceleración, que se mide en un bus de transporte público de pasajeros durante una ruta de servicio, permite utilizar estos valores para analizar los efectos que tienen sobre la carrocería al momento que se estudia un impacto frontal.
- En el capítulo tres, se analizó todas las condiciones iniciales a las que va a estar sometida la carrocería del bus durante un impacto frontal, estas se las ingresa en la simulación para su respectivo análisis. La selección correcta de las condiciones de frontera permite obtener resultados válidos para el presente estudio.
- Por medio del método de elementos finitos (MEF) se puede analizar el comportamiento de la deformación de la carrocería cuando existe un impacto frontal durante una ruta servicio, logrando así identificar los daños que pueden ocasionar a los ocupantes e identificar las zonas más críticas durante una colisión.

4.3 Análisis de los resultados de la prueba “A”.

- Para la prueba “A” se realizó la simulación de un choque frontal de la carrocería del bus contra una pared rígida de concreto a una velocidad de 90km/h con un intervalo de tiempo de 150 ms, obteniendo como resultado deformaciones en la estructura de 21 cm en dirección Z, longitudinal a la dirección de movimiento del bus, las cuales invaden el espacio de supervivencia.

- Con el valor equivalente de Von Mises de $\sigma = 546 \text{ MPa}$ obtenida en la simulación, se puede verificar que se ha superado la zona elástica del acero ASTM A500; este valor del esfuerzo se encuentra en la zona plástica del acero y comparando con las propiedades mecánicas del acero ASTM A500, en donde el esfuerzo de ruptura máximo es de $\sigma = 405 \text{ MPa}$, se concluye que el material utilizado en la carrocería absorbió la mayor cantidad de energía de deformación, la misma que superó el límite de ruptura del acero.
- La deformación de la carrocería en dirección Z, longitudinal a la dirección de movimiento del bus tiene un valor de $\delta = 21 \text{ cm}$, producto de esta deformación la carrocería invade el espacio de supervivencia de la estructura.
- Con el balance de energía se muestra valores de la energía total de $6.10e^{08} \text{ mJ}$ y la de Hourglass de $2,52e^{07} \text{ mJ}$ lo cual permite validar el ensayo computacional y esta relación no debe superar el 5 %. La relación obtenida es de 4.13 %.

4.4 Análisis de los resultados para la prueba “B”.

- Para la prueba “B” se realizó la simulación de un choque frontal de la carrocería del bus contra una pared rígida de concreto a una velocidad de 90km/h, además se consideró los valores de aceleración medidos con un intervalo de tiempo de 150 ms, obteniendo como resultado una deformación en dirección Z de 25 cm, longitudinal a la dirección de movimiento del bus.
- El esfuerzo de Von Mises obtenido de $\sigma = 584 \text{ MPa}$ a superado la zona elástica del acero ASTM A500, debido a que el esfuerzo es alto esto hace que el acero permanezca en la zona plástica teniendo en cuenta que el esfuerzo máximo a la ruptura es de $\sigma = 405 \text{ MPa}$. Por lo expuesto se llega a la conclusión de que el material empleado en la carrocería del bus absorbió la mayor cantidad de energía de deformación lo cual superó el límite de ruptura del acero comprometiendo la integridad de los pasajeros del bus.
- El balance de energía de un sistema de impacto se rige por la ley de la conservación de la energía, en caso de impacto la energía cinética que posee el sistema es convertida en energía potencial sonora y de calor. La energía cinética es absorbida por toda la carrocería del bus ya que la energía debe conservarse (Biradar & Anjan Babu, 2014). La transformación de la energía se da cuando la energía interna tiene un valor de $5.64e^{08} \text{ mJ}$, la energía cinética de $7.39 e^{06} \text{ mJ}$ y la energía total permanece constante con un valor de $6.08e^{08} \text{ mJ}$.
- La relación obtenida entre la energía total y la de Hourglass para la validación del estudio es de 4.47 % lo cual no supera el 5 % y se considera como valido el estudio.

4.5 Comparación de resultados de la prueba “A” y “B”.

- Comparando los resultados de esfuerzos de la prueba “A” con respecto a la prueba “B” existe una diferencia de 36 MPa , lo cual permite concluir que el efecto de la conducción genera cambios de aceleración durante la ruta de servicio y estos aplicados en una

simulación de impacto produce esfuerzos de deformación mayores a los obtenidos en la prueba "A".

- La deformación total en la prueba "A" es de 214 cm y para la prueba "B" es de 251 cm, con el efecto de la desaceleración considerada en la prueba "B" se tiene un incremento de 37 cm más que en la prueba "A".
- La deformación obtenida en el mismo punto de la carrocería en la prueba "A" en dirección Z longitudinal a la dirección de movimiento del bus es de 21cm y la de la prueba "B" en la misma dirección es de 25 cm, por lo tanto, la carrocería sometida a condiciones en la prueba "B" causa más daños a los elementos estructurales invadiendo el espacio de supervivencia, comprometiendo así la integridad de los pasajeros del bus durante una colisión por impacto frontal.
- La relación entre la energía total y la de Hourglass que se obtiene en la prueba "A" tiene un valor de 4.13 % y en la prueba "B" tiene un valor de 4.47 %, por lo cual las dos pruebas se consideran validas ya que no superan el 5 % según requerimiento del reglamento ECE R66.

5. Conclusiones.

- Una vez culminado el estudio y realizar la evaluación correspondiente a los resultados obtenidos se puede concluir que se ha logrado conseguir todos los objetivos esperados.
- La simulación de impacto frontal de la geometría realizada del bus para su análisis en el software computacional ANSYS con la extensión LS Dyna donde permite predecir con bastante exactitud el comportamiento real de las estructuras, ya que es un software especializado para diversas simulaciones y sucesos dinámicos donde existen esfuerzos máximos y mínimos del material, así como deformaciones y absorción de energía.
- En el presente estudio se estableció parámetros de simulación óptimos fundamentadas en investigaciones realizadas por otros autores, lo cual permitió determinar que para obtener una malla optima el factor de Skewness el valor se debe aproximar a cero para lo cual en este caso de estudio se obtuvo un valor de 0.9 que es aceptable; de igual manera los factores de Warpaje y Jacobiano que son parámetros que establece la calidad de malla están dentro de lo permitido que es 0.016 y 0.89 respectivamente. Además, se utilizó el modelo del material *Bilinear Isotropic Hardening* en donde se cargan los valores reales como el límite elástico y el módulo tangente.
- La superestructura del bus es uno de los elementos principales de la seguridad pasiva en este tipo de automotores, es utilizada para alojar y proteger a todos los ocupantes, en donde el diseño de la carrocería es fundamental para identificar las zonas críticas de deformación. El presente estudio brinda información relevante que permitirá la selección de nuevos perfiles para la fabricación de carrocerías y así de esta manera tratar de reducir al mínimo los daños que pueden ocasionar a los ocupantes durante una colisión.
- Los resultados obtenidos del ensayo virtual se validaron mediante el método de la energía de Hourglass, la cual realiza una relación entre la energía total y la energía de Hourglass, esta relación no debe exceder el 5 % de esta manera se concluye que es válido el presente estudio.
- El efecto de la conducción genera diferentes valores de aceleración, estos datos obtenidos son utilizado en la prueba "B" donde se tiene un esfuerzo mayor al que se obtuvo en la prueba "A", llegando a la conclusión que la aceleración si afecta a la estructura debido a que al momento de un impacto el conductor intenta frenar tanto como sea posible, lo cual produce desaceleraciones bruscas generando fuerzas internas adicionales las cuales se deben considerar al momento de que se produzca un siniestro.

- La energía cinética es la entrada de trabajo debido al impacto producido y la energía interna es la salida de trabajo donde la energía interna es adsorbida por la estructura del bus y es directamente proporcional al producto de la fuerza.
- El presente trabajo ha contribuido en gran medida nuestro aprendizaje, potenciando los conocimientos adquiridos en la universidad y aportando nuevas ideas en conjunto con nuestro tutor.

6. Recomendaciones.

- Al momento de realizar el modelo CAD de la carrocería se debe aproximar al elemento real tanto como sea posible; se debe verificar que el modelo no presente interferencias, separaciones, duplicados en sus miembros estructurales antes de realizar la simulación; esta verificación permite no tener fallas durante la simulación.
- Es importante analizar la calidad de la malla utilizada en el estudio para garantizar la convergencia del método, además tiene influencia en el gasto computacional al momento de realizar la simulación y en el tiempo de resolución.
- En los ensayos computacionales no se pueden determinar todas las deformaciones y daños en la carrocería durante un impacto, esto debido que al momento que se genera una colisión en carretera existen más factores que acompañan a un accidente de tránsito, como por ejemplo factores humanos; una manera de ser más exactos en este tipo de análisis son las prueba físicas lo cual involucra una inversión altamente costosa y a esto se sumaría la complejidad en sí de los ensayos; por lo expuesto la técnica de elementos finitos es una alternativa viable que proporciona resultados confiables en estos tipos de análisis.
- Se recomienda utilizar nuevos materiales que brinden la máxima seguridad a los ocupantes de un bus en el caso de un accidente de tránsito. Estos nuevos materiales deben tener buenas características de resiliencia esto con la finalidad de absorber la energía producida en un impacto.

Referencias Bibliográficas.

- AHMSA. (2013). Manual de Diseño para la Construcción con Acero. *Altos Hornos de Méjico*, 1–31. <https://doi.org/Doi 10.1200/Jco.2004.06.906>
- Biradar, G., & Anjan Babu, V. A. (2014). Automotive crash box performance analysis and simulation during frontal rigid barrier crash. *International Journal of Science and Research*, 3(9), 1431–1437.
- Bueche, F. J., & Hecht, E. (2007). *Física General de Shaum*.
- Walpole, R. E. (2012). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. México: Pearson.
- Puente Cuasapud, G. (2018). *Análisis Estructural A Cargas De Impacto Posterior Por Alcance De Un Bus Interprovincial Mediante El Método De Elementos Finitos*.
- Moreno-Zulca, P. A., Llanes-Cedeño, E. A., Guaña-Fernández, W. V., & Jima-Matailo, J. C. (2020). Análisis estructural de un bus por el método de elementos finitos. In *Polo del Conocimiento* (Vol. 5). <https://doi.org/10.23857/pc.v5i01.1265>
- Agencia Nacional de Tránsito ANT - Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador - ANT. (n.d.). Retrieved June 15, 2020, from <https://www.ant.gob.ec/>
- European Union. (2012). Addendum 28: Regulation No. 29. *Official Journal of the European Union*, (Addendum 28: Regulation No. 29), 26.
- Ecuatoriana, C. (1836). *Ecuatoriana Nte Inen 1836*.
- Loaeza Becerril, D. (2014). *Obtención de curvas esfuerzo-deformación verdaderas del PP y copolímeros en bloque a velocidad de deformación constante aplicando correlación de imágenes digitales*. 23–26. Retrieved from https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/23900/TFM_David.pdf
- SIMULACIÓN DE UN CHOQUE FRONTAL DIFERENTES TIPOS DE BARRERA PROYECTO FIN DE CARRERA Ingeniería Técnica Industrial : Mecánica Tutor :* (2009).
- Murillo Martínez, F. (2018). *Análisis mediante elementos finitos del comportamiento de perfiles combinados de estructuras de autobuses*. 168.
- INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. (2016). Vehículos de transporte público de pasajeros intraregional, interprovincial e intraprovincial. *Inen, Primera re*, 30.

SANTOS CORREA, L. A. (2018). *Simulación Por El Método De Los Elementos Finitos Del Impacto Frontal De Un Bus Interprovincial De Fabricación Nacional, Para Proponer La Modificación De La Norma Técnica Ecuatoriana Nte Inen 1323:2009*. 1. Retrieved from <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/13743/5/T-ESPE-057806.pdf>
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10846/1/T-ESPE-049674.pdf>

INCO LTDA - Aceros inoxidables - Propiedades. (n.d.). Retrieved June 7, 2020, from <http://www.inco.com.uy/home2016/institucional/propiedades/>

Manjarrés, F., & Santillán, E. (2016). *Análisis Estructural a Cargas De Impacto Frontal De Un Bus Tipo Interprovincial Mediante El Método De Elementos*.

de Zaruma a Cuenca - Google Maps. (n.d.). Retrieved February 15, 2020, from <https://www.google.com/maps/dir/Zaruma/Cuenca/@-3.2947029,-79.5887676,10z/data=!3m1!4b1!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0x9034a741091664d1:0x2169a4d0da63865c!2m2!1d-79.6109049!2d-3.6873033!1m5!1m1!1s0x91cd18095fc7e881:0xafd08fd090de6ff7!2m2!1d-79.0058965!2d-2.9001285>

No Title. (n.d.). Retrieved from <https://www.google.com/maps>

Alberto, J., & Álvarez, V. (2019). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD Y*.

Ortiz, P. P., & d'Istruzione e d' Educazione, M. (1860). *Principios elementales de fisica experimental y aplicada incluso la meteorolog{\`i}a y la climatolog{\`i}a, conteniendo todos los ultimos descubrimientos ... por Pedro P. Ortiz*. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=aTVR38huQCAC>

Álvarez, G., & Paúl, D. (2014). *Director :*

Bernal Iñiguez, J. D. (2014). Diseño, construcción e implementación de un sistema de captura de movimiento para análisis ergonómico de riesgo laboral de extremidades superiores. *Universidad Politécnica Salesiana*, 1–99. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7508/1/UPS-CT004422.pdf>

Arduino - Inicio. (n.d.). Retrieved March 20, 2020, from <https://www.arduino.cc/>

Pozo, T. (2012). *Física y química, 4 ESO : ciencias de la naturaleza*. Barcelona: Edebe.

Santriono Refki, R. R. (2019). No Title سلطانة عمان *ペインクリニック学会治療指針 2 . ペインクリニック学会治療指針 2 , 4(1), 75–84*. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.126.1.78>

- Windpassinger, M. (2014). *Der innerdeutsche Fernreisemarkt: Bahn und Bus im Vergleich*. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=KnWyBAAAQBAJ>
- CUATZO LOZANO, M. I. (2005). Instituto politécnico nacional. *Ciencias Marinas*, 49 *Suppl 1*, 104. <https://doi.org/Tesis de Ingenieria Civil>
- Bartlett, D. W. (David W.), 1828-1912. (2005). *The Project Gutenberg eBook of Paris: With Pen and Pencil, by David W. Bartlett*. Retrieved from <http://www.gutenberg.org/files/16943/16943-h/16943-h.htm>
- Artero, Ó. T. (2013). *ARDUINO. Curso práctico de formación*. Retrieved from <https://books.google.es/books?id=6cZhDmf7suQC>
- Arduino - Inicio. (n.d.). Retrieved December 12, 2019, from <https://www.arduino.cc/>
- ¿Cómo calcular la aceleración? (fórmulas y ejemplos). (n.d.). Retrieved December 12, 2019, from <https://www.ejemplos.co/calcular-la-aceleracion/>
- Ortiz, P. P., & Educacione, M. d' I. e d'. (1860). *Principios elementales de fisica experimental y aplicada incluso la meteorología y la climatología, conteniendo todos los ultimos descubrimientos ... por Pedro P. Ortiz*. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=aTVR38huQCAC>
- wikipedia. (n.d.). Locomotora - Wikipedia, la enciclopedia libre. Retrieved September 9, 2019, from <https://es.wikipedia.org/wiki/Locomotora>
- Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE). (2015). *Disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos de grandes dimensiones para el transporte de pasajeros por lo que respecta a la resistencia de su superestructura*. (78), 30–59.
- NUÑEZ MILÁN, G. (2017). *Simulación De Un Ensayo De Vuelco De Autobús Mediante Ls-Dyna*.
- De Derecho, C. (2017). *UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE JURISPRUDENCIA, CIENCIAS POLITICAS Y SOCIALES Accidentes de Tránsito producidos por Imprudencia y Negligencia de*. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13253/1/T-UCE-0013-Ab-167.pdf>